



Contribution à la conception de systèmes d'assemblage automobile, performants, pérennes et innovants par des indicateurs technologiques et économiques répondant à la diversité croissante des produits.

Meriem Lafou

► To cite this version:

Meriem Lafou. Contribution à la conception de systèmes d'assemblage automobile, performants, pérennes et innovants par des indicateurs technologiques et économiques répondant à la diversité croissante des produits.. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Paris Saclay (COMUE), 2016. Français. NNT : 2016SACLN021 . tel-01347022

HAL Id: tel-01347022

<https://theses.hal.science/tel-01347022>

Submitted on 20 Jul 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

NNT : 2016SACLN021

THESE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITE PARIS-SACLAY,
préparée à l'ENS Cachan

ÉCOLE DOCTORALE N° 579
Sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences
Spécialité *Génie Mécanique, Productique*

Par

Madame Meriem Lafou

**Contribution à la conception de systèmes d'assemblage automobile, performants,
pérennes et innovants par des indicateurs technologiques et économiques
répondant à la diversité croissante des produits**

Thèse présentée et soutenue à *Cachan*, le 11 Juillet 2016.

Composition du Jury :

M. Emmanuel Caillaud	Professeur, Université de Strasbourg	Président
M. Pierre Castagna	Professeur, Université de Nantes	Rapporteur
M. Yannick Frein	Professeur, Grenoble INP	Rapporteur
M. Nabil Anwer	Maitre de conférences, HDR, Paris XIII	Examinateur
Mme Olga Battaia	Professeur, ISAE-SUPAERO, Toulouse	Examinatrice
M. Luc Mathieu	Professeur, Université Paris-Sud	Directeur de thèse
M. Marc Alochet	Expert leader, RENAULT SA	Invité
M. Stéphane Pois	Expert, RENAULT SA	Invité



Remerciements

Cette thèse s'est déroulée dans le cadre d'une convention CIFRE entre le groupe RENAULT SA et le LURPA de l'ENS Cachan.

Je tiens tout d'abord à exprimer toute ma reconnaissance et tout mon respect à Monsieur Luc Mathieu, Professeur à l'Université Paris-Sud, pour avoir dirigé ces travaux, pour sa disponibilité, pour ses conseils et pour tout ce qu'il m'a appris durant ces trois années de thèse.

Je remercie Monsieur Marc Alochet, Expert leader à Renault et Monsieur Stéphane Pois, Expert Conception à Renault, d'avoir accepté de m'encadrer et de m'accueillir dans leur Département Ingénierie Production Véhicule (DIPV). Je les remercie pour leur confiance et leurs conseils avisés.

Je remercie Monsieur Pierre Castagna, Professeur à l'Université de Nantes et Monsieur Yannick Frein, Professeur à Grenoble INP, d'avoir accepté d'être rapporteurs de mon mémoire de thèse. L'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux, leurs conseils pertinents ainsi que leurs remarques constructives ont assuré un meilleur aboutissement à ce travail.

Je tiens à remercier M. Nabil Anwer, Maître de conférences HDR à Paris 13, chercheur au LURPA, ENS Cachan, Université Paris-Saclay, Madame Olga Battaia, Professeur à l'ISAE-SUPAERO de Toulouse et Monsieur Emmanuel Caillaud, Professeur à l'Université de Strasbourg, d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Merci aux membres du LURPA, et plus particulièrement à l'équipe GEO3D, avec lesquels j'ai eu l'occasion d'apprendre et d'échanger durant ces années passées au laboratoire. Merci à tous pour l'ambiance générale, les chaleureuses pauses café et les fameux Jap' du mercredi midi.

Pour finir, je tiens à adresser un grand MERCI à ma famille et mes amis pour m'avoir toujours soutenu et encouragé durant toutes ces années.

Table des matières

Remerciements	1
Table des matières	3
Table des figures	7
Liste des tableaux	9
Introduction générale	11
1 Contexte industriel et problématique scientifique	13
1.1 Introduction	15
1.2 Contexte industriel	17
1.3 Problématique scientifique	18
1.4 Objectifs de nos travaux de recherche	20
2 Etat de l’art général	23
2.1 Introduction	25
2.2 Typologie des systèmes de production	25
2.2.1 Evolution des systèmes de production	25
2.2.2 Principaux systèmes de production	26
2.2.3 Description d’une ligne d’assemblage	29
2.3 Gestion de la diversité	32
2.3.1 Types de diversités	32
2.3.2 La différenciation retardée	34
2.3.3 La complexité induite par la diversité du produit	35
2.3.4 Synthèse	36
2.4 Flexibilité des systèmes de production	37
2.4.1 Définitions	37
2.4.2 Types de flexibilité	39
2.4.3 Conclusion	41
2.5 Synthèse	42
3 Concept de la convertibilité d’un système d’assemblage automobile	45
3.1 Introduction	47

3.2	Description de l'environnement du travail d'assemblage	47
3.2.1	Description d'un système d'assemblage automobile	47
3.2.2	Ligne d'assemblage	48
3.2.3	Conclusion	51
3.3	Description du véhicule automobile	52
3.3.1	Représentation du véhicule automobile	52
3.3.2	Gestion de la diversité dans un atelier d'assemblage automobile	53
3.3.3	Conclusion	54
3.4	Concept de la convertibilité d'une ligne d'assemblage automobile	55
3.4.1	Présentation de la démarche	55
3.4.2	Présentation du concept AutoConvert	58
3.5	Périmètre de l'étude et hypothèses générales	60
3.5.1	Périmètre de l'étude	60
3.5.2	Hypothèses générales	60
3.6	Synthèse	61
4	Modèles mathématiques pour l'évaluation de la convertibilité d'un système assemblage automobile	63
4.1	Introduction	65
4.2	Convertibilité Processus – Ressources	65
4.2.1	Revue de la littérature scientifique	65
4.2.2	Présentation de l'approche	71
4.2.3	Conclusion	74
4.3	Convertibilité Produits - Ressources	74
4.3.1	Revue de la littérature scientifique	74
4.3.2	Présentation de l'approche	76
4.3.3	Conclusions	83
4.4	Convertibilité Produits - Processus	83
4.4.1	Revue de la littérature scientifique	83
4.4.2	Présentation de l'approche	85
4.4.3	Conclusion	89
4.5	Etude de coûts	89
4.5.1	Revue de la littérature scientifique	89
4.5.2	Présentation de l'approche	91
4.5.3	Formulation mathématique	93
4.5.4	Conclusion	93
4.6	Synthèse	93
5	Applications industrielles	95
5.1	Introduction	97
5.2	Applications des indicateurs de convertibilité	97

5.2.1	Collecte de données	97
5.2.2	Vue globale des tronçons considérés	97
5.2.3	Application de l'indicateur de la convertibilité Processus – Ressources . .	98
5.2.4	Application de l'indicateur de la convertibilité Produits – Ressources . .	100
5.2.5	Application de l'indicateur de la convertibilité Produits – Processus . .	104
5.3	Application de l'indicateur global de la convertibilité d'une ligne d'assemblage automobile	106
5.3.1	Description de l'étude de cas	106
5.3.2	Application du modèle global de convertibilité	107
5.3.3	Analyse des résultats	117
5.4	Conclusions	121
Conclusions et perspectives		123
Bibliographie		129

Table des figures

1	Représentation synoptique de l'organisation de la thèse	12
1.1	Modèle de la performance (Gibert, 1980)	15
1.2	Collection des mesures de performance des systèmes de production (Hon, 2005)	16
1.3	Description de la problématique scientifique	20
2.1	Evolution des systèmes de production	25
2.2	Représentation d'un système de production (Koren, 2010a)	26
2.3	Etendue du CMS (Wiendahl, et al., 2007)	27
2.4	Types de production Vs Types de systèmes de production	28
2.5	Types de lignes d'assemblage	29
2.6	Etapes de construction d'une ligne d'assemblage	30
2.7	La diversité fonctionnelle	33
2.8	La diversité technique	33
2.9	La diversité processus	34
2.10	Illustration du point de différenciation	35
2.11	Les trois approches basiques de la différenciation retardée	35
2.12	Classification des types de diversité	37
2.13	Les niveaux de la variabilité (Wiendahl, et al., 2007)	40
2.14	Définition du périmètre de la problématique	41
2.15	Les types de flexibilité	42
3.1	Principaux ateliers d'un système de production automobile	47
3.2	Décomposition d'un atelier d'assemblage	49
3.3	Organisation d'une ligne d'assemblage automobile	49
3.4	Représentation d'un pas de travail	50
3.5	Définition d'une famille de produit	53
3.6	Gestion des composants dans une ligne d'assemblage automobile	54
3.7	Illustration de la diversité au niveau de la ligne d'assemblage	55
3.8	Eléments caractérisant la convertibilité d'un système d'assemblage automobile	57
3.9	Aspect technologique physique de la convertibilité d'un système d'assemblage automobile	58
3.10	Aspect logique de la convertibilité d'un système d'assemblage automobile	59
3.11	AutoConvert : Convertibilité d'un système d'assemblage Automobile	59

4.1	Types de configurations	66
4.2	Exemples d'implantations	68
4.3	Exemples de configurations	69
4.4	Exemple d'une ligne d'assemblage traitant trois variantes différentes	71
4.5	Heuristique pour l'évaluation de la convertibilité Processus - Ressources du tronçon 1	73
4.6	Exemple d'interface de préhension	77
4.7	Exemple d'interface outil	78
4.8	Exemple d'interface de posage	79
4.9	Evolution de la convertibilité Produits - Ressources en fonction de la diversité des composants	81
4.10	Evolution de la convertibilité Produits - Ressources en fonction de la diversité des interfaces	82
4.11	Illustration d'une contrainte ergonomique	87
4.12	Illustration des données de la convertibilité Produits - Processus	88
4.13	Evolution de la convertibilité Produits - Processus en fonction du nombre de contraintes vérifiées	88
4.14	Fonction coût-bénéfice de la variabilité (Schuh, et al., 2012)	90
5.1	Tronçons étudiés de l'atelier d'assemblage	98
5.2	Assemblage du moteur et de la boîte de vitesses	99
5.3	Assemblage du GMP	101
5.4	Assemblage du sous-caisse	104
5.5	Vissage du sous – caisse	107
5.6	Types d'interfaces Produits - Ressources	120

Liste des tableaux

1.1	Principaux laboratoires traitant la flexibilité des systèmes de production	19
2.1	Comparaison entre la production de masse, la personnalisation de masse et la production personnalisée (adapté de (Hu et al., 2011)	32
2.2	Positionnement par rapport à la littérature scientifique	42
3.1	Caractérisation de la diversité en atelier d'assemblage automobile	52
3.2	Caractérisation de la convertibilité d'un système d'assemblage	56
4.1	Adaptation des principaux facteurs pour l'évaluation de la convertibilité d'un système d'usinage à un système d'assemblage automobile.	70
4.2	Les scénarii possibles quand une nouvelle variante est introduite	85
5.1	Données de l'évaluation de la convertibilité Processus – Ressources	100
5.2	Indicateur de convertibilité Produits – Ressources pour l'usine 1	102
5.3	Indicateur de convertibilité Produits – Ressources pour l'usine 2	102
5.4	Vérification des contraintes de la convertibilité Produits - Processus pour l'usine 1	105
5.5	Vérification des contraintes de la convertibilité Produits - Processus pour l'usine 2	105
5.6	Données de l'évaluation de la convertibilité Processus – Ressources	108
5.7	Convertibilité Processus – Ressources des quatre usines considérées	108
5.8	Coût de la convertibilité Processus – Ressources	109
5.9	Indicateur de convertibilité Produits – Ressources pour l'usine 1	110
5.10	Indicateur de convertibilité Produits – Ressources pour l'usine 2	111
5.11	Indicateur de convertibilité Produits – Ressources pour l'usine 3	112
5.12	Indicateur de convertibilité Produits – Ressources pour l'usine 4	113
5.13	Coût de la convertibilité Produits – Ressources	114
5.14	Indicateur de convertibilité Produits – Processus	116
5.15	Coût de la convertibilité Produits – Processus	117
5.16	Résultats des indicateurs technologiques	118
5.17	Résultats de l'indicateur de coût	118
5.18	Hierarchisation des composants	121

Introduction générale

Dans un marché concurrentiel, les industriels sont amenés à répondre à des besoins fonctionnels variés par des réponses individuelles, de manière à diversifier et élargir leur clientèle et gagner des parts de marché. Il en est advenu un marché de plus en plus segmenté dans lequel les industriels se doivent d'innover et d'adapter chaque produit aux besoins spécifiques de chaque client. A cause du contexte actuel marqué par l'incertitude et l'urgence, la flexibilité est devenue l'un des critères les plus importants de la performance industrielle. En effet, les entreprises doivent se doter aujourd'hui de systèmes de production flexibles capables d'absorber la diversité des produits et faire face aux exigences des clients qui sont en constante évolution. Les solutions d'ateliers flexibles développées dans les années 80 et 90 n'offrent plus les mêmes perspectives de rentabilité. Par conséquent, il est nécessaire de développer et appliquer des modèles technico-économiques adaptés à la performance attendue par le marché.

Le but de ce travail de recherche est de dégager les grands paramètres influant sur ces notions et de développer des indicateurs de flexibilité permettant de faire face aux incertitudes de l'industrie automobile. Il a ainsi pour objectif de rendre économiquement performant, dans l'instant et dans le temps les orientations techniques, de limiter les investissements et les ressources nécessaires à faire évoluer les lignes d'assemblage automobile et d'augmenter leur réactivité aux marchés.

Les travaux de recherche se sont déroulés au sein du Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée (LURPA) à l'ENS de Cachan, de l'université Paris-Saclay et en étroite collaboration avec le département Process Montage du constructeur automobile RENAULT. Cette configuration a permis d'offrir un cadre théorique pour le développement des solutions et un cadre pratique pour évaluer la robustesse des indicateurs proposés. Ce document expose la synthèse de nos travaux de recherche portant sur l'évaluation de la flexibilité des lignes d'assemblage automobile lors de l'introduction d'une diversité produit. En conséquence, la thèse est organisée en cinq chapitres articulés selon le schéma synoptique défini dans la figure 1, et mettant en évidence notre contribution à travers les chapitres 3, 4 et 5.

Le **premier chapitre** s'intitulant « *Contexte industriel et problématique scientifique* » présente les enjeux industriels et le contexte scientifique, définissant le périmètre et la problématique de nos travaux de recherche.

Le **deuxième chapitre**, « *Etat de l'art général* », expose les travaux déjà réalisés et ceux toujours en cours, au regard de la problématique posée. Cette problématique se focalise sur les thèmes de la gestion de la diversité et l'évaluation de la flexibilité des systèmes de production.

Le **troisième chapitre**, « *Concept de la convertibilité d'un système d'assemblage automobile* », introduit un concept autour de l'évaluation de la convertibilité d'un système d'assemblage automobile, que l'on a baptisé AutoConvert, en référence à l'Automobile et à la Convertibilité.

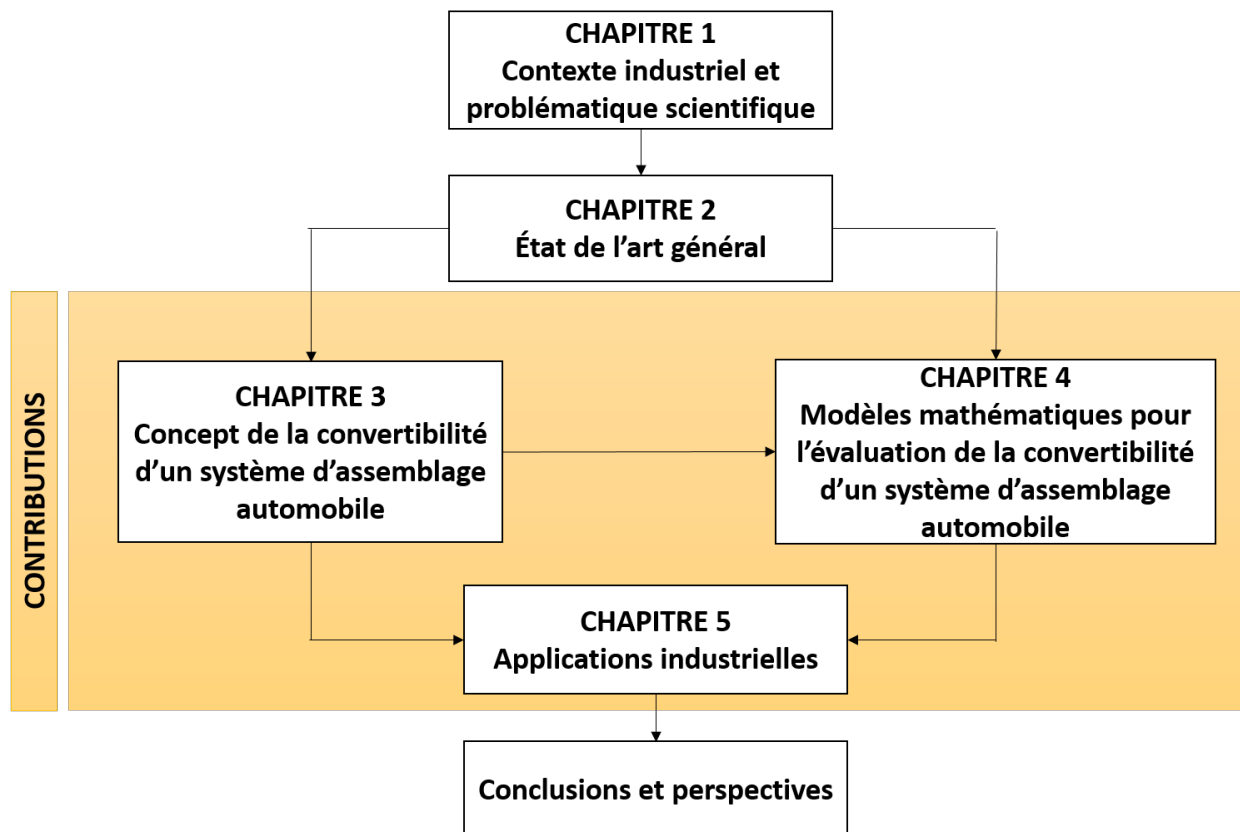


Figure 1 – Représentation synoptique de l'organisation de la thèse

Nous décrirons, de manière détaillée, le concept proposé et mettons en exergue les interactions entre les principaux éléments d'une ligne d'assemblage automobile lors de l'introduction d'une nouvelle variante du produit.

Le **quatrième chapitre**, « *Modèles mathématiques pour l'évaluation de la convertibilité d'un système d'assemblage automobile* », présente les modèles mathématiques des indicateurs de convertibilité caractérisant les interactions du concept AutoConvert, qui permettent d'évaluer la convertibilité d'un système d'assemblage automobile lors de l'introduction d'une nouvelle variante produit.

Le **chapitre cinq**, « *Applications industrielles* », permet d'illustrer chaque indicateur de convertibilité par des applications de l'industrie automobile.

Enfin, dans la dernière partie de ce document, « *Conclusions et perspectives* », sont présentées les principales contributions de cette thèse ainsi que les perspectives pouvant être considérées à la suite de ces travaux de recherche.

Chapitre **1**

Contexte industriel et problématique scientifique

L'objet de ce chapitre est la présentation du contexte industriel de nos travaux de recherche et la problématique scientifique qui en découle. En effet, la première partie de ce chapitre est dédiée à l'analyse du sujet de thèse et la déduction des orientations de recherche et des pistes de réflexion pour son traitement. La deuxième et troisième parties sont consacrées, respectivement, à la présentation des nouveaux besoins du marché industriel et l'élaboration de la liste des principaux laboratoires de recherche qui se sont intéressés à notre problématique scientifique. Enfin, dans la dernière partie, nous présentons le périmètre et les objectifs de nos travaux de recherche.

Sommaire

1.1	Introduction	15
1.2	Contexte industriel	17
1.3	Problématique scientifique	18
1.4	Objectifs de nos travaux de recherche	20

1.1 Introduction

La **performance** est une exigence permanente à tous les niveaux de l'entreprise, qui ne cesse de se renforcer sous la pression de la concurrence et de la complexité des organisations. Étymologiquement, le mot « performance » dérive du vieux français « parformer » qui signifie « accomplir, exécuter ». Trois sens du terme « performance » peuvent être retenus de la définition du Larousse (2003), à savoir :

« 1. Résultat obtenu par un athlète, par un cheval de course, etc., dans une épreuve ; chiffre qui mesure ce résultat ; 2. Réussite remarquable ; exploit ; 3. Résultat obtenu dans l'exécution d'une tâche ».

La performance pourrait donc être définie comme la capacité à agir selon des critères d'optimalité très variés, afin d'atteindre un résultat. Elle désigne aussi bien le résultat que les actions qui ont permis de l'atteindre (Bourguignon, 1996). Dans une approche classique, l'entreprise étant une institution à finalités essentiellement économiques, le management de la performance peut alors être défini comme « la mise en place d'actions et moyens susceptibles de conduire à la rentabilité » (Cohanier, et al., 2010). Cependant, d'autres approches sont apparues prenant en compte des facteurs tels que : l'environnement, le social, la politique, la juridiction ... La performance ne serait donc plus uniquement financière mais plutôt multidimensionnelle avec une nécessaire prise en compte de l'humain.

Un modèle fondateur de la performance a été introduit par (Gibert, 1980), il relie la performance aux principales notions qui lui sont associées, qui sont les objectifs, les résultats, les moyens, l'efficacité, l'efficience et la pertinence (Voir Figure 1.1).

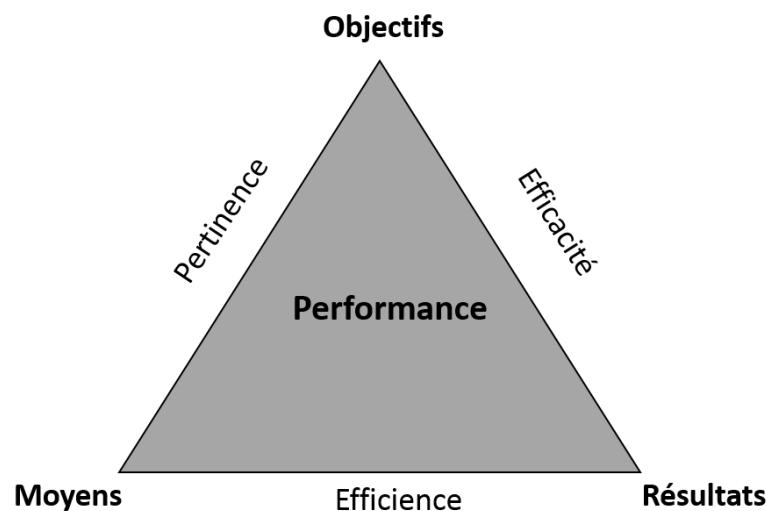


Figure 1.1 – Modèle de la performance (Gibert, 1980)

- **L'axe Objectifs - Résultats** définit l'efficacité et permet de savoir si l'entreprise est suffisamment efficace pour atteindre ses objectifs, même si cela pourrait nécessiter des ressources supplémentaires.
- **L'axe Résultats - Moyens** définit l'efficience qui représente le rapport entre l'effort produit et les moyens déployés dans une activité ; c'est-à-dire l'atteinte des objectifs avec le moindre coût. L'efficience économique se réfère au ratio sortie/entrée.

- **L'axe Moyens - Objectifs** désigne la pertinence et permet de savoir si l'entreprise s'est munie des bons moyens pour atteindre ses objectifs.

Dans une étude sur les mesures de performance pour les systèmes de production, un total de 442 mesures individuelles a été recueilli et classé selon les principaux critères de performance à savoir, le coût, la qualité, le temps, la productivité et la flexibilité (voir figure 1.2) (Hon, 2005). Sont exclues du champ d'application de ce cadre, les mesures de performance dans d'autres secteurs tels que le marketing, la satisfaction du client, la durabilité et les ressources humaines.

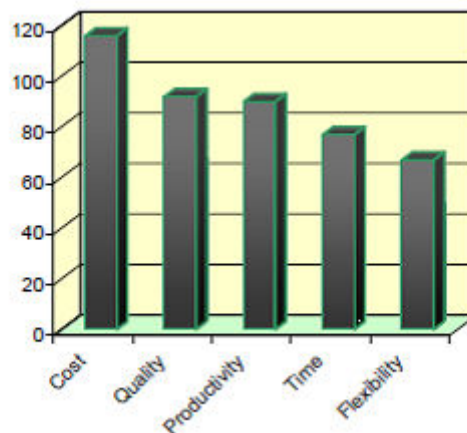


Figure 1.2 – Collection des mesures de performance des systèmes de production (Hon, 2005)

Cette étude montre que les mesures de **coût** et les mesures de **flexibilité** occupent respectivement le plus haut et le plus bas niveau du classement, en raison de la dominance de l'approche classique qui réduisait la performance à une rentabilité financière et de la prise en conscience un peu tardive de l'importance de la flexibilité dans l'évaluation de la performance des systèmes de production.

De par son aspect multidimensionnel, la performance se veut aussi pérenne. La **pérennité** est une dimension de la performance qui reflète le degré auquel la stabilité et la croissance de l'organisation ont des chances d'être maintenues au cours de l'épreuve du temps. La pérennité de l'organisation renvoie à la protection et au développement des ressources financières (rentabilité de l'organisation), à la protection et au développement du marché (compétitivité), à la protection et au développement de la qualité du produit ou service (De la Villarmois, 2001). Ces critères fournissent des indications sur la capacité de l'entreprise à s'adapter à son environnement et à créer durablement de la valeur à l'ensemble de ses parties prenantes.

Dans l'environnement concurrentiel actuel, il apparaît que pour être performant, l'entreprise doit également faire preuve d'**innovation** pour satisfaire les exigences de ses clients. Innover consiste ainsi à mettre sur le marché un nouveau produit, introduire un nouveau processus de valorisation ou de fabrication ou un nouveau modèle d'organisation dans l'entreprise. L'innovation est une réponse efficace et originale à un besoin réel, qui désigne à la fois un processus et son résultat.

Du point de vue du degré d'intensité technologique, deux types d'innovation apparaissent dans la littérature (Ait-El-Hadj, 1989) (Christofol, et al., 2004) (Devalan, 2006) :

- **L'innovation incrémentale ou continue**, concerne un changement apporté à quelque chose d'existant. En effet, elle permet d'améliorer ou d'adjoindre des fonctions com-

plémentaires à un objet, un processus, ou encore un service, le faisant ainsi évoluer légèrement. Elle permet à l'entreprise de conserver son avance technologique sur ses concurrents.

- **L'innovation radicale ou de rupture** qui consiste, quant à elle, à créer un produit, un processus ou encore un service très différent de celui qui préexistait. En effet, elle modifie profondément les conditions d'utilisation des clients et peut même constituer une véritable révolution technologique.

D'après l'étude réalisée par (Devalan, 2006), ces deux types d'innovations sont répartis de la façon suivante :

- plus de 90% d'innovations incrémentales.
- moins de 10% d'innovations de rupture.

A travers cette première analyse des trois mots clés du sujet de thèse, à savoir la **performance**, la **pérennité** et l'**innovation**, plusieurs points sont à retenir. Tout d'abord, la **performance est multidimensionnelle** et ne pourrait se réduire à une rentabilité financière. Ses principaux critères sont le coût, le délai, la qualité, la productivité et la flexibilité. A cause du contexte actuel marqué par l'incertitude, la flexibilité est devenue l'un des critères les plus importants de la performance industrielle. En effet, les entreprises doivent se doter aujourd'hui de systèmes de production flexibles capables d'absorber la diversité des produits et faire face aux exigences des clients qui sont en constante évolution. De plus, afin de renforcer leurs capacités concurrentielles, les industriels doivent fournir des efforts d'investissement en termes de R&D et d'innovation pour garantir une pérennité à leurs activités. Pour mieux positionner le thème de recherche du sujet de thèse, nous proposons, dans le paragraphe suivant, de compléter cette analyse par une description du contexte industriel.

1.2 Contexte industriel

Face à une clientèle de plus en plus exigeante, à des cycles de vie de plus en plus courts et à des délais de livraison accélérés, les industries de production se trouvent contraintes à gérer une importante diversité en termes de produits, processus et volumes. En effet, les fabricants sont amenés à répondre à des besoins fonctionnels variés par des réponses individuelles pour satisfaire au mieux les exigences de leurs clients et conquérir davantage de parts de marché.

Les entreprises doivent donc gérer à la fois **l'incertitude ou l'imprévisibilité**, ainsi que **l'urgence** : « On ne sait pas à l'avance ce qu'il faut faire, mais il faut le faire vite » (Everaere, 1997). Il importe de préciser que c'est la conjonction de l'incertitude et de l'urgence qui rend la flexibilité problématique. En effet, s'il n'y a pas d'incertitude et que l'on connaît les difficultés à l'avance, on peut rapidement mettre en place les moyens pour les résoudre. D'un autre côté, s'il y a incertitude mais pas d'urgence, on a alors le temps d'examiner en détail la nature des problèmes et d'y apporter des solutions optimales.

Adapter chaque produit aux besoins spécifiques de chaque client est le défi relevé par les industries automobiles. Pour faire face à la concurrence, elles doivent procéder à une augmentation rapide du nombre de modèles mis sur le marché. En effet, la clientèle, de plus en

plus versatile, recherche de nouveaux concepts automobiles adaptés à ses usages qui sont, eux-mêmes, en évolution constante. Ceci explique, entre autres, le succès croissant des cross over, croisement entre différents types de véhicules.

Une fois son modèle choisi, le client veut avoir un véhicule unique. Ceci conduit les constructeurs à proposer de multiples possibilités d'adaptation : pièces de décor, peintures spécifiques, pièces d'équipement à la teinte. Cependant, une meilleure information des consommateurs crée chez ces derniers une plus grande exigence et une moins grande fidélité.

Pour faire face à cette conjoncture en maîtrisant les coûts de production, les industries ont besoin de se doter de moyens leur permettant de satisfaire leurs clients et anticiper les éventuels changements. Aujourd'hui, les entreprises n'ont plus le choix, elles sont contraintes à réagir dans l'incertitude et l'urgence pour garder leur part du marché. Le raccourcissement des délais de production mais aussi d'innovation pour de nouveaux produits devient ainsi pour les entreprises, un facteur de survie dans un environnement à forte variabilité.

1.3 Problématique scientifique

Dans le cadre du CIRP (International Academy for Production Engineering), cette situation a fait l'objet de plusieurs travaux scientifiques, dont les principaux sont (Hu, et al., 2011) et (ElMaraghy, et al., 2013). En effet, ces travaux expriment clairement la problématique et le nouveau besoin pour l'industrie manufacturière et, en particulier, pour l'automobile. Il montre les limites des solutions actuelles permettant de formuler les problématiques scientifiques de recherches d'avenir. Dans la littérature, l'évolution des systèmes de production en vue d'intégrer les nouveaux besoins du marché, a fait l'objet de plusieurs travaux. Les concepts clés relevés sont :

- La flexibilité des systèmes de production (Sethi, et al., 1990)(Beskese, et al., 2004)(Tolio, 2008).
- La gestion de la diversité du produit (Lanza, et al., 2010) (ElMaraghy, et al., 2013).
- Les caractéristiques des systèmes de fabrication reconfigurables en les comparant aux systèmes de fabrication flexibles et les lignes dédiées (Koren, et al., 1999) (Mehrabi, et al., 2000) (Koren, et al., 2010b).
- La variabilité des systèmes de production et sa comparaison avec l'adaptabilité et la flexibilité (Wiendahl, et al., 2007) (Ross, et al., 2008) (Schuh, et al., 2012).
- La convertibilité et l'évolutivité (Maier-Sperdelozzi, et al., 2003) (Koren et al. 2010b).

Certains chercheurs se sont penchés sur l'étude des modèles de traitement de la complexité induite par la diversité croissante en traitant plus particulièrement les principaux thèmes suivants :

- La typologie des lignes d'assemblage (parallèle, série ou hybride, que cela soit en symétrique ou asymétrique) en fonction de la cascade d'assemblage du produit et de la diversité de chacun de ses composants (Koren, 2010a) (Hu, et al., 2011).
- L'optimisation du lieu d'introduction de la diversité dans une ligne d'assemblage (Lee, et al., 1997).

- La simulation du comportement d'un système de production piloté par le produit (Cardin, et al., 2008).

Alors que d'autres chercheurs se sont intéressés à l'équilibrage de la charge de travail des systèmes de production dans un contexte de variabilité :

- Équilibrage des postes de travail et prise en compte des perturbations industrielles (Baybars, 1986) (Becker et al., 2006) (Boysen, et al., 2007) (Essafi, et al., 2010) (Battaïa, et al., 2013).
- Prise en compte des contraintes d'espacement dans le lissage de la charge de travail des opérateurs (Lesert, et al., 2011).

Laboratoire	Principaux travaux	Principales contributions
Department of Mechanical Engineering , The University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA	(Maier-Sperdelozzi, et al., 2002) (Maier-Sperdelozzi, et al., 2003) (Koren, 2010b) (Hu, et al., 2011)	Les systèmes de production reconfigurables La convertibilité
Laboratory for Manufacturing Systems and Automation, University of Patras, Greece	(Chryssolouris, 1996) (Alexopoulos, et al., 2007) (Chryssolouris, et al., 2013)	Types de flexibilité Mesures de flexibilité
Intelligent Manufacturing Systems Centre, University of Windsor, Canada	(Azab, et al., 2007) (ElMaraghy, et al., 2013) (AlGeddawy, et al., 2013) (Navaei, et al., 2016)	Les systèmes de production variables Gestion de la diversité du produit
Department of Mechanical Engineering, Politecnico di Milano, Milano, Italy	(Tolio, 2008) (Tolio, et al., 2010)	Les systèmes de production à flexibilité ajustée Le concept de la co-évolution des systèmes de production

Tableau 1.1 – Principaux laboratoires traitant la flexibilité des systèmes de production

Afin de mieux positionner notre contribution, nous nous intéresserons aux travaux réalisés au niveau international, via les principales communautés mobilisées autour des problématiques de la gestion de la diversité et de la flexibilité des systèmes de production. Nous dressons le tableau 1.1 pour regrouper les principaux laboratoires ainsi que leurs principales contributions à notre sujet de recherche. Tous les travaux cités dans le tableau 1.1 seront repris en détail dans le chapitre de l'état de l'art.

L'objectif de cette thèse est d'apporter des réponses à la problématique scientifique suivante : Comment évaluer et mesurer la flexibilité des systèmes d'assemblage automobile pour faire face à la diversité des produits ?

1.4 Objectifs de nos travaux de recherche

Le thème de recherche est la conception d'ateliers d'assemblage automobile **performants**, **pérennes** et **innovants**. Un atelier d'assemblage doit être pérenne dans le temps. Il ne doit pas être remis en cause par les futures productions, par les innovations sur modèles, par les aléas commerciaux (échecs ou succès des modèles produits) ou par les aléas économiques (crise, boom, réglementations ...). Il doit également être capable d'intégrer les grandes évolutions de politiques techniques (Plateforme, Modules ...).

Le but de ce travail de recherche est de dégager les grands paramètres influant sur ces notions et de développer les modèles d'ateliers optimisés et performants qui couvrent les incertitudes de l'industrie automobile. Ce travail permettra ainsi de rendre économiquement performant, dans l'instant et dans le temps les orientations techniques, de limiter les investissements et les ressources nécessaires à faire évoluer les usines RENAULT et d'augmenter leur réactivité aux marchés (Voir figure 1.3).

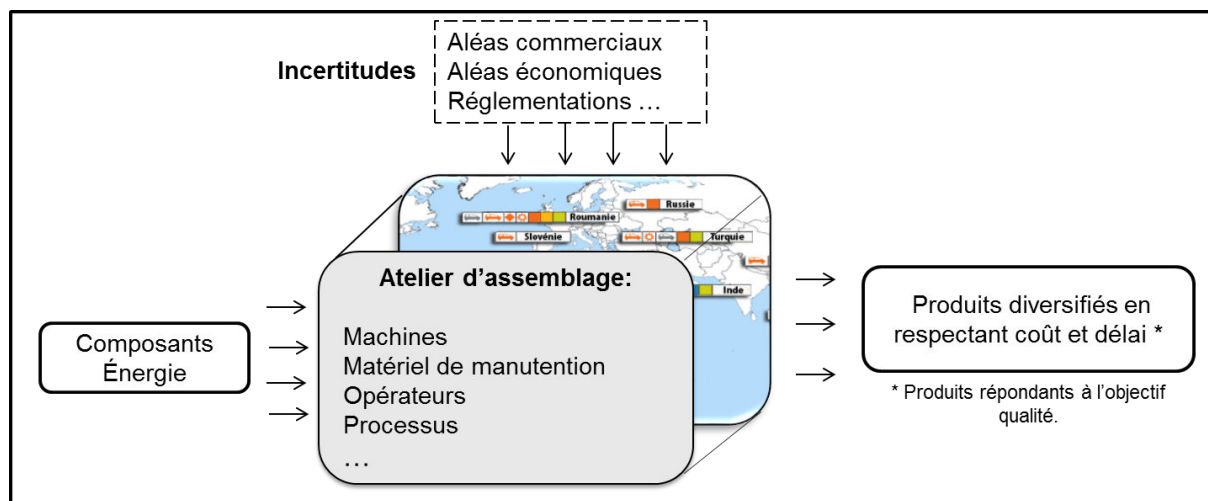


Figure 1.3 – Description de la problématique scientifique

Ainsi, nous formulons les objectifs de notre travail de recherche comme suit :

- Caractériser un système d'assemblage automobile et le positionner par rapport aux autres systèmes de production.
- Dégager les grandes règles de conception d'une ligne d'assemblage.

- Identifier les paramètres clés pour l'évaluation de la flexibilité des systèmes d'assemblage en industrie automobile.
- Construire des indicateurs permettant de quantifier et comparer la flexibilité de plusieurs usines quant à l'introduction d'une nouvelle variante du produit.
- Appliquer les indicateurs proposés à des cas réels.

Chapitre **2**

Etat de l'art général

L'objet de ce chapitre est de positionner notre problématique scientifique par rapport aux différents travaux de recherche qui traitent du même sujet. En effet, la démarche suivie s'est basée sur les principaux mots clés identifiés lors de l'analyse du sujet de thèse, à savoir : le système de production, la gestion de la diversité et la flexibilité.

Sommaire

2.1	Introduction	25
2.2	Typologie des systèmes de production	25
2.2.1	Evolution des systèmes de production	25
2.2.2	Principaux systèmes de production	26
2.2.2.1	Le système de production dédié	26
2.2.2.2	Les ateliers flexibles	27
2.2.2.3	Le système de production reconfigurable	27
2.2.2.4	Le système de production variable	27
2.2.2.5	Le système de production à flexibilité ajustée	28
2.2.2.6	Conclusion	28
2.2.3	Description d'une ligne d'assemblage	29
2.2.3.1	Définition d'une ligne d'assemblage	29
2.2.3.2	Construction d'une ligne d'assemblage	29
2.2.3.3	Synthèse	31
2.3	Gestion de la diversité	32
2.3.1	Types de diversités	32
2.3.1.1	La diversité fonctionnelle	32
2.3.1.2	La diversité technique	33
2.3.1.3	La diversité processus	33
2.3.2	La différenciation retardée	34
2.3.3	La complexité induite par la diversité du produit	35
2.3.4	Synthèse	36
2.4	Flexibilité des systèmes de production	37
2.4.1	Définitions	37
2.4.2	Types de flexibilité	39
2.4.3	Conclusion	41
2.5	Synthèse	42

2.1 Introduction

Ce chapitre expose l'étude des travaux de recherche qui ont été conduits et qui sont en cours de réflexion, en lien avec la problématique énoncée dans le chapitre précédent. Chaque partie de ce chapitre est centrée sur l'étude d'un mot clé des trois mots clés identifiés, à savoir les systèmes de production, la diversité et la flexibilité. De ce fait, la partie 2 de ce chapitre, relate les principales évolutions des systèmes de production et met en exergue les caractéristiques de chaque type. De manière plus spécifique, la partie 3 fait état des types de diversité et leur influence dans l'apparition des nouveaux paradigmes dans les systèmes de production. La partie 4, quant à elle, reporte les travaux de recherche sur les définitions de la flexibilité des systèmes de production ainsi que des différents types de flexibilité identifiés. Enfin, la dernière partie présente une synthèse des différents points traités auparavant. Cet état de l'art permet de délimiter le périmètre de notre contribution, et ainsi d'apporter un référentiel scientifique aux pratiques industrielles pour mieux positionner nos travaux de recherche.

2.2 Typologie des systèmes de production

2.2.1 Evolution des systèmes de production

L'objet de ce paragraphe est de passer en revue les différentes périodes qui ont marquées les systèmes de production. En effet, depuis sa naissance, il y a 150 ans, l'industrie de production est passée par plusieurs étapes. La première fut celle de la production artisanale qui fabriquait exactement le produit que le client commandait mais à un coût très élevé. (Voir figure 2.1)

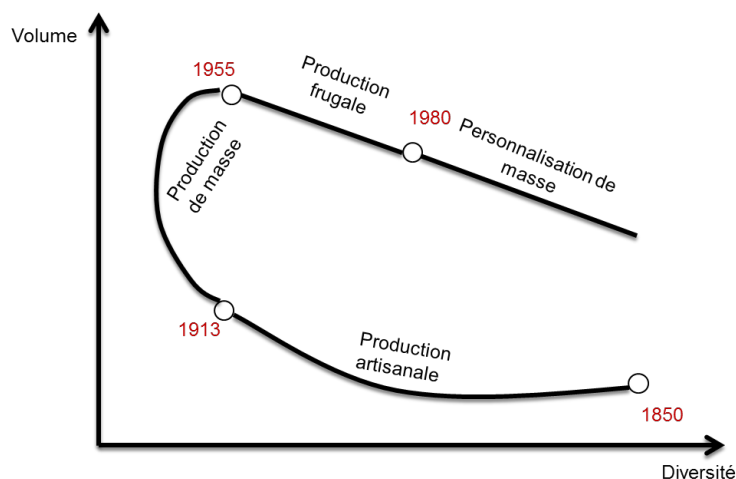


Figure 2.1 – Evolution des systèmes de production

La production de masse, quant à elle, est apparue vers les débuts du 20ème siècle. Et c'est grâce à laquelle, on a commencé à produire de grands volumes à des coûts moins élevés. Toutefois, dans ce type de production, le client avait un choix très limité, dont témoigne la célèbre citation d'Henry Ford : « *Any Customer can have a car painted any color that he wants so long as it is black* » (Ford, 2008).

En 1955, apparaît **la production frugale**, connue sous l'appellation de « Lean Manufacturing », un modèle développé par Toyota, qui vise à atteindre une excellence opérationnelle en dotant l'entreprise d'une grande souplesse et une capacité à reconfigurer en permanence ses processus

techniques, organisationnels et son management. Ce fut une étape préparatoire pour faire face à la demande des clients qui deviennent de plus en plus exigeants et cherchent beaucoup plus de diversité.

C'est dans ce contexte où apparaît **la personnalisation de masse**, un modèle dans lequel l'entreprise propose une panoplie d'options de son produit et laisse libre-choix au client pour définir la combinaison qui lui convient le plus. L'objectif de la personnalisation de masse est de réaliser des économies d'envergure grâce à la segmentation du marché en concevant des variantes du produit. Elle cherche à fournir un produit personnalisé à des coûts proches de la production de masse.

Pour des clients encore plus exigeants, certaines entreprises proposent **une production personnalisée**. Elle permet ainsi au client de définir son produit et de réaliser une production sur mesure. Cette production vise une catégorie de clients qui cherchent à se démarquer et à s'appropriier les produits commandés. L'objectif est ainsi d'offrir une valeur de différenciation garantie en engageant les clients dans le processus de conception et de réalisation des produits. Pour mieux cerner notre problématique, nous définissons, ci-après, les principaux types des systèmes de production suivant leur apparition chronologique.

2.2.2 Principaux systèmes de production

Un système de production est défini par (Koren, 2010a), comme **un ensemble de machines de production (ou stations de travail) qui sont intégrées pour effectuer un ensemble contrôlé d'opérations répétitives sur les matières premières, ce qui modifie cette dernière en vue d'obtenir la forme finale souhaitée, ou d'assembler un produit final** (voir Figure 2.2).

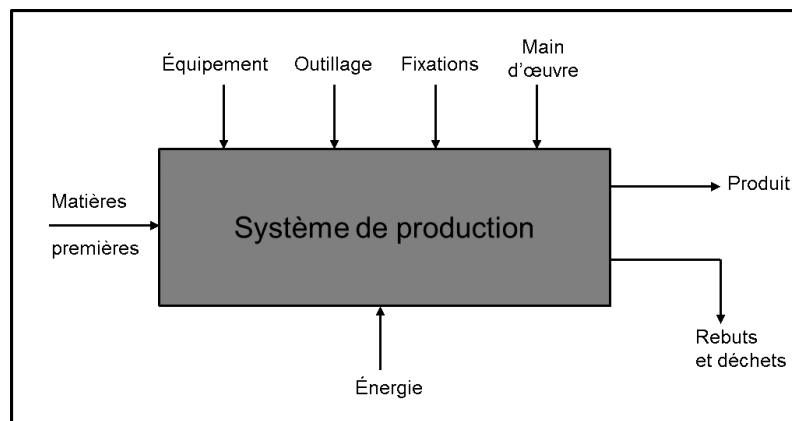


Figure 2.2 – Représentation d'un système de production (Koren, 2010a)

2.2.2.1 Le système de production dédié

Le système de production dédiée, (*Dedicated Manufacturing System (DMS)*), est basé sur l'« automatisation dure » (hard automation) et permet de produire un seul type de pièce en très grandes quantités. Les machines dédiées sont des machines peu coûteuses et faciles à entretenir. Cependant, toute modification d'un DMS en vue d'ajouter une nouvelle opération/fonctionnalité nécessite un temps d'arrêt et des frais importants avant de ne pouvoir assurer le retour de la ligne à son efficacité optimale. L'introduction d'un nouveau produit nécessite

de refaire entièrement la ligne (Gupta, et al., 1992).

2.2.2.2 Les ateliers flexibles

Les ateliers flexibles, (*Flexible Manufacturing System (FMS)*), représentent les machines à commandes numériques ainsi que d'autres automates programmables. Ces machines sont capables d'effectuer de nombreuses opérations différentes. Le FMS peut par conséquent produire une diversité de produits dans le même système. La capacité de production des FMS est nettement inférieure (Faible débit) à celles des lignes dédiées et leur coût d'investissement initial est beaucoup plus élevé (Warnecke, et al. 82) (Browne, et al., 1984) (Sethi, et al., 1990) (Shivanand, 2006).

2.2.2.3 Le système de production reconfigurable

Le système de production reconfigurable, (*Reconfigurable Manufacturing System (RMS)*), est caractérisé par son caractère dynamique, lui permettant de faire face aux changements du marché contrairement au caractère statique du FMS et DMS. Le RMS repose sur trois piliers : Coût, qualité et réactivité. Pour préserver sa part de marché, une entreprise devrait produire à bas coût pour s'aligner au prix de la concurrence. Le RMS est conçu dès le départ pour un changement rapide de la structure, ainsi que dans les composants matériels et logiciels, afin d'ajuster rapidement la capacité de production et la fonctionnalité dans une famille de pièces en réponse à des changements soudains sur le marché ou à des exigences réglementaires (Koren, et al., 1999) (Koren, et al., 2010b) (Mehrabi, et al., 2000).

2.2.2.4 Le système de production variable

Le système de production variable, (*Changeable Manufacturing System (CMS)*), a pour objectif de réaliser rapidement et efficacement tous les ajustements nécessaires pour adapter le système à l'évolution constante de son environnement. La variabilité, « *changeability* », est un terme qui est apparu pour couvrir l'ensemble des changements que pourraient subir les structures et les processus d'une usine, que ce soit au niveau logique ou au niveau physique (Voir figure 2.3).

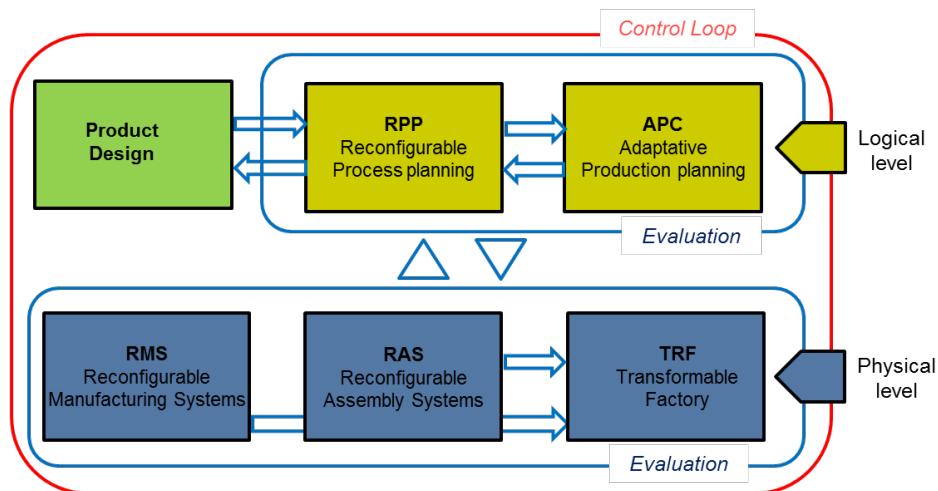


Figure 2.3 – Etendue du CMS (Wiendahl, et al., 2007)

La variabilité est donc un cadre général qui englobe de nombreux paradigmes tels que l'agilité, l'adaptabilité, la flexibilité et la reconfigurabilité, qui sont eux-mêmes des facilitateurs de la gestion de la diversité des produits (Wiendahl, et al., 2007). La définition de ces différents paradigmes sera présentée dans la partie 3 du présent chapitre.

2.2.2.5 Le système de production à flexibilité ajustée

Le système de production à flexibilité ajustée, (*Focused flexibility for manufacturing system (FFMS)*), est introduit par (Tolio, 2010). En partant du fait que la flexibilité du système de production n'est pas toujours indispensable (De Matta et al., 2001), la flexibilité du système doit être adaptée aux exigences de production, visant à réaliser le compromis optimal entre la productivité et la flexibilité. La stratégie de personnaliser les caractéristiques du système selon les exigences actuelles et potentielles de production donne un avantage aux industriels, car il est possible de réduire l'effort d'investissement en augmentant ainsi la rentabilité qui permettra au système d'anticiper les changements potentiels et éviter le risque du surinvestissement (argent immobilisé). (Terkaj, et al., 2009) (Tolio, 2010).

2.2.2.6 Conclusion

Le système de production est passé par plusieurs étapes pour répondre aux exigences d'un environnement en constante évolution. Grâce aux avancées technologiques, plusieurs concepts ont été développés pour faire face aux exigences du marché et doter les entreprises de moyens évolutifs pour absorber ces fluctuations et rester compétitives. Le graphe de la figure 2.4 permet de croiser les différents types de productions ainsi que les principaux types de systèmes de production présentés ci-dessus. Nous constatons que plusieurs systèmes de production (RMS, CMS, FFMS) ont été développés pour répondre aux besoins de la personnalisation de masse. En effet, celle-ci revêt une complexité particulière qui résulte de l'incertitude, lié au caractère imprévisible des clients et à l'urgence, qui constitue un véritable enjeu pour l'entreprise qui doit faire preuve d'une importante réactivité pour faire face à ses concurrents et garder sa part de marché.

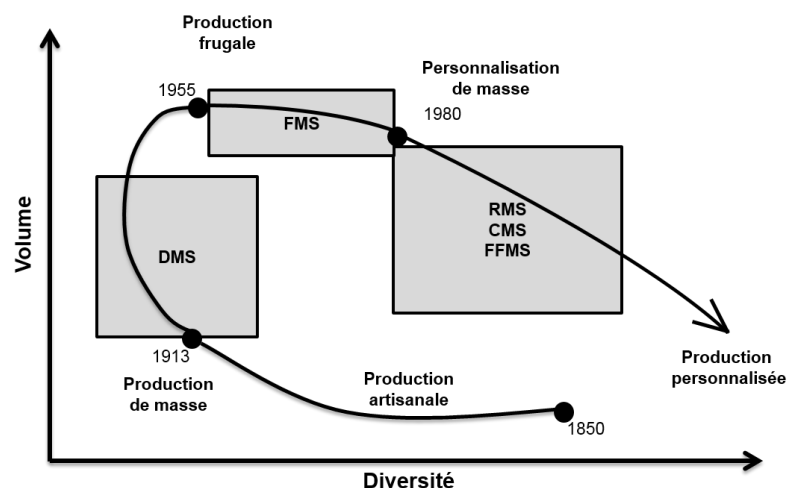


Figure 2.4 – Types de production Vs Types de systèmes de production

D'autres systèmes de production ont été développés mais sont rarement repris dans la

littérature, nous citons les systèmes de production holoniques (Van Brussel, et al., 1998) (Valckenaers, et al., 2005) et les systèmes de production bioniques (Tharumarajah, 1996).

2.2.3 Description d'une ligne d'assemblage

2.2.3.1 Définition d'une ligne d'assemblage

Une **ligne d'assemblage** est composée de postes de travail arrangés le long d'un système de manutention. Les composants sont assemblés progressivement d'un poste de travail à l'autre suivant une séquence bien définie jusqu'à obtention du produit final. En se basant sur la typologie des systèmes de production, nous pouvons distinguer trois types de lignes d'assemblage (Voir figure 2.5) :

La ligne d'assemblage à modèle unique : C'est une ligne multi-étapes dans laquelle un produit est fabriqué d'une manière continue dans de grandes quantités. Ce type de ligne a été développé pour la production de masse (DML).

La ligne d'assemblage multi-modèles : C'est une ligne dans laquelle l'assemblage de produits différents est effectué par lots séparés pour chaque type de produit. En effet, Les différents modèles du produit sont significativement distincts, par conséquent la production est exécutée par lots pour chaque modèle du produit.

La ligne d'assemblage à modèles mélangés : C'est une ligne dans laquelle différents produits sont assemblés simultanément. Dans ce cas, nous parlons d'une famille de produits avec plusieurs variantes. Les procédés sont similaires, parce que les variantes sont légèrement différentes (CMS).

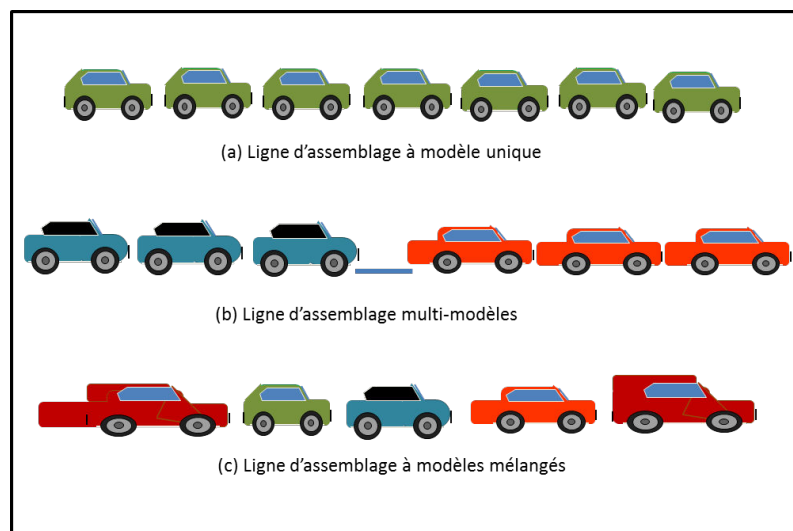


Figure 2.5 – Types de lignes d'assemblage

2.2.3.2 Construction d'une ligne d'assemblage

La construction d'une ligne d'assemblage passe par plusieurs étapes (Voir figure 2.6). Nous nous sommes inspirés des travaux de recherche de (Hu, et al., 2011) et (Koren, 2010a) ainsi que des pratiques industrielles chez Renault pour établir la liste d'étapes suivante :

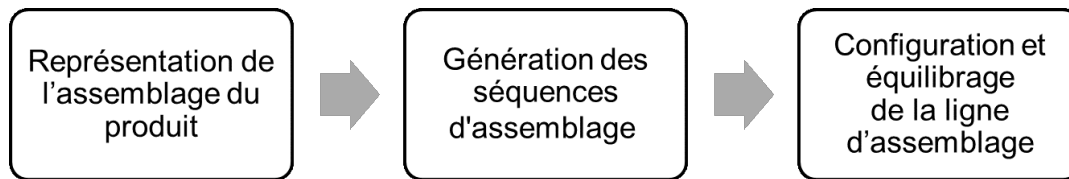


Figure 2.6 – Etapes de construction d'une ligne d'assemblage

(1) Représentation de l'assemblage du produit

La représentation de l'assemblage du produit est une étape primordiale qui permet de déduire la précédence des tâches d'assemblage et générer toutes les séquences d'assemblage possibles. Plusieurs outils ont été développés pour représenter la relation entre les différents composants dans un système d'assemblage.

Pour un produit unique, nous citons la « *Bill Of Materials (BOM)* », qui est un outil qui permet de lister toutes les pièces, sous-ensembles et matériaux qui composent le produit et peut aussi inclure d'autres informations comme les quantités, coûts et méthodes de fabrication (Hopp, et al., 2011). Ainsi que « *le graphe de liaisons* » qui est un réseau graphique où les nœuds représentent les pièces et les arcs représentent les relations entre les pièces.

Cependant, l'augmentation de la diversité du produit a conduit à de nouvelles approches pour la représentation de l'assemblage. Plusieurs outils ont été développés comme le « *Product Family Architecture (PFA)* », qui est un outil qui permet de définir la manière avec laquelle les différents éléments du produit sont arrangés et comment ils interagissent entre eux. Et d'autres adaptés, comme la « *Generic Bill Of Materials, (GBOM)* » qui est une adaptation de la BOM, qui met en évidence les relations fonctionnelles et structurelles entre les composants pour représenter la diversité du produit (Nanda, et al., 2007) et le « *Graphe de liaison de la famille du produit* » qui, quant à lui, est une adaptation du graphe de liaison pour représenter la diversité du produit. Il combine les graphes de liaison des variantes du produit, en représentant leurs composants communs comme un nœud unique. Le graphe de liaison permet aussi de déduire la précédence des tâches d'assemblage et ainsi de générer l'ensemble des séquences d'assemblage possibles.

(2) Génération des séquences d'assemblage

La séquence joue un rôle clé dans la détermination de la qualité du produit assemblé et des problèmes de conception du processus d'assemblage (besoins en fixations, capacité de tester les en-cours, le nombre d'étapes d'assemblage...). Plusieurs outils et approches ont été développés pour générer les séquences d'assemblage, nous citons, le « *Graphe And/Or* » qui a été utilisé pour développer un algorithme complet pour générer toutes les séquences d'assemblage possibles (Homem de Mello, et al., 1990). L'« *Assembly Sequence Planning and Evaluation system (ASPEN)* » est une approche qui se base sur la décomposition des produits et détermine la séquence optimale en utilisant les *Méthodes de Mesure du Temps* pour déterminer le temps de fonctionnement (Kanai, et al., 1996).

(3) Configuration et équilibrage de la ligne d'assemblage

Après avoir généré l'ensemble des séquences possibles, la conception d'un système d'assemblage est accomplie par la configuration et l'équilibrage de la ligne. Les configurations d'un système d'assemblage sont déterminées par la disposition des machines et des connexions entre celles-ci.

On distingue des configurations en série, en parallèle ou hybride. Elles peuvent également être classées en configurations synchrones et configurations asynchrones.

- **La configuration symétrique** est une configuration durant laquelle chaque composant subi la même séquence d'opérations quelle que soit sa trajectoire au sein du système.
- **La configuration asymétrique**, quant à elle, est une configuration durant laquelle les composants peuvent subir des séquences d'opérations différentes dépendant de leurs trajectoires au sein du système.

La conception de la ligne d'assemblage est finalisée par **l'équilibrage** de celle-ci. Equilibrer une ligne d'assemblage consiste à rechercher l'attribution optimale des tâches d'assemblage aux différentes stations de travail en tenant compte des contraintes de production. En effet, une mauvaise affectation des opérations aux stations peut entraîner un temps mort non justifié et donc des coûts supplémentaires inutiles pour chacun des produits assemblés. (Jin, et al., 2003) (Ko, et al., 2008).

2.2.3.3 Synthèse

Le monde manufacturier est passé par plusieurs périodes, chacune d'elle a vu la naissance d'un ou plusieurs types de production. Pour suivre cette évolution, un nombre de systèmes de production a été développé suivant les besoins et les spécificités de chaque période (DMS, FMS, RMS, CMS, FFMS... etc).

Cependant, nous pouvons distinguer entre trois principaux types de production à savoir **la production de masse, la personnalisation de masse et la production personnalisée**. Nous présentons dans le tableau suivant la spécificité de chaque type en termes d'objectifs de production et d'implication des clients (Voir tableau 2.1).

Un premier positionnement de notre problématique est de définir le type de production dans lequel nous travaillons, qui, dans notre cas, est **la personnalisation de masse**. En effet, RENAULT offre à ses clients une panoplie d'options et leur laisse libre-choix de faire la combinaison qu'il souhaite. Les premières constations en usine ont permis de distinguer différents véhicules traités sur la même ligne d'assemblage. Par conséquent, le système de production considéré est **une ligne d'assemblage à modèles mélangés**. En outre, les étapes de construction d'une ligne d'assemblage ont permis de souligner les principales difficultés lors de la conception, la configuration et l'équilibrage de la ligne, et qui sont principalement liées à la gestion de la diversité des produits.

Cette première partie de la littérature a permis d'identifier un mot clé supplémentaire qui est la diversité. Par conséquent, la prochaine étape consiste à répondre aux interrogations suivantes : Quels sont les types de diversité? Comment est traitée la diversité et quel est son impact sur la ligne d'assemblage?

	Production de masse	Personnalisation de masse	Production personnalisée
Objectif	Économie d'échelle	Économie d'envergure	Valeur de différenciation
Implication du client	Acheter	Choisir	Définir
Exemples de Système de production	DMS	FFMS/RMS/CMS	Système de production à la demande

Tableau 2.1 – Comparaison entre la production de masse, la personnalisation de masse et la production personnalisée (adapté de (Hu et al., 2011))

2.3 Gestion de la diversité

La diversité peut être réalisée à différentes étapes de la réalisation du produit : Conception, fabrication, assemblage, ventes ou durant la phase d'usage. Et parfois même en phase de fin de vie. Plusieurs types de diversités ont été identifiés dans la littérature.

2.3.1 Types de diversités

En se plaçant au niveau de la conception des produits et des processus, (Agard, et al., 2003) ont classé la diversité en trois niveaux : (1) **La diversité fonctionnelle**, (2) **La diversité technique** et (3) **La diversité processus**.

2.3.1.1 La diversité fonctionnelle

Il s'agit du type de diversité le plus apparent pour le client. La diversité fonctionnelle est liée à la diversité commerciale offerte aux clients. Elle permet à l'entreprise de faire face à la concurrence en proposant des options supplémentaires qui permettent de répondre aux besoins d'une clientèle devenue de plus en plus exigeante (Voir figure 2.7). (Cialvaldini, 1995) distingue entre deux types de diversité fonctionnelle :

« – une diversité congénitale : elle représente la diversité mise en œuvre lors du lancement d'un nouveau modèle,
– une diversité thérapeutique : elle apparaît en cours de vie du modèle afin d'adapter et de faire évoluer le produit par rapport à la concurrence, ou de s'ouvrir de nouvelles niches de marché. »

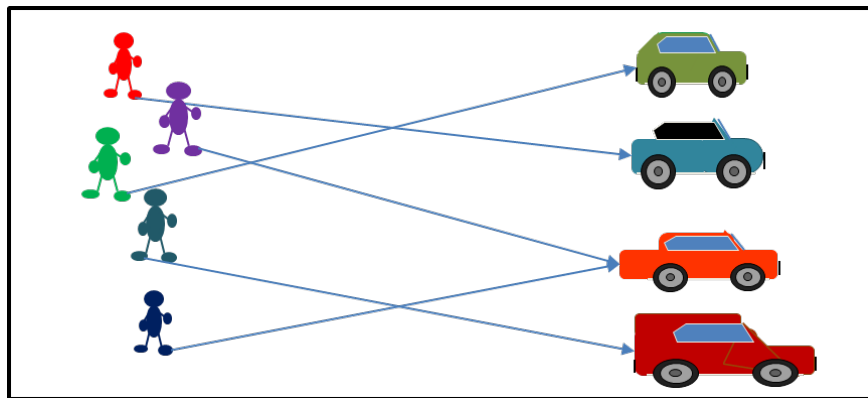


Figure 2.7 – La diversité fonctionnelle

2.3.1.2 La diversité technique

La diversité technique traduit sur le plan technique la réalisation de la diversité fonctionnelle. L'entreprise cherche à la réduire en essayant de maximiser l'utilisation de ses ressources pour la réalisation des différentes diversités fonctionnelles. Un simple besoin fonctionnel pourrait avoir des répercussions techniques importantes (Voir figure 2.8). Au fil du temps, l'entreprise peut développer des compétences techniques, un effet d'apprentissage qui lui permet d'optimiser sa diversité technique.

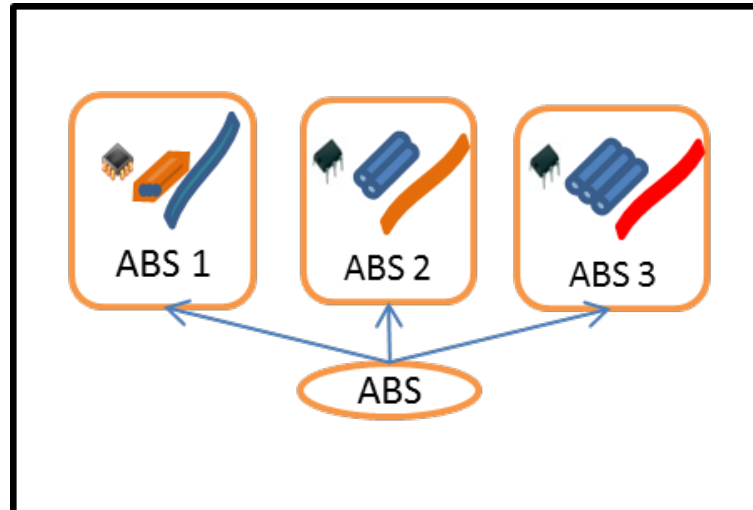


Figure 2.8 – La diversité technique

2.3.1.3 La diversité processus

La diversité processus concerne tous les processus requis pour la réalisation de la diversité technique (Voir figure 2.9). Selon (Agard, et al., 2003), la diversité processus pourrait évoluer par :

- L'introduction de nouvelles machines,
- L'évolution du réseau de fournisseurs,

- L'évolution des méthodes de gestion de production, gestion des stocks...

La diversité processus provoque des problèmes de qualité, de gestion des stocks et d'organisation. Cette catégorie de diversité est très coûteuse, il faut donc la limiter au maximum pour limiter les surcoûts de production dus à l'introduction de la diversité.

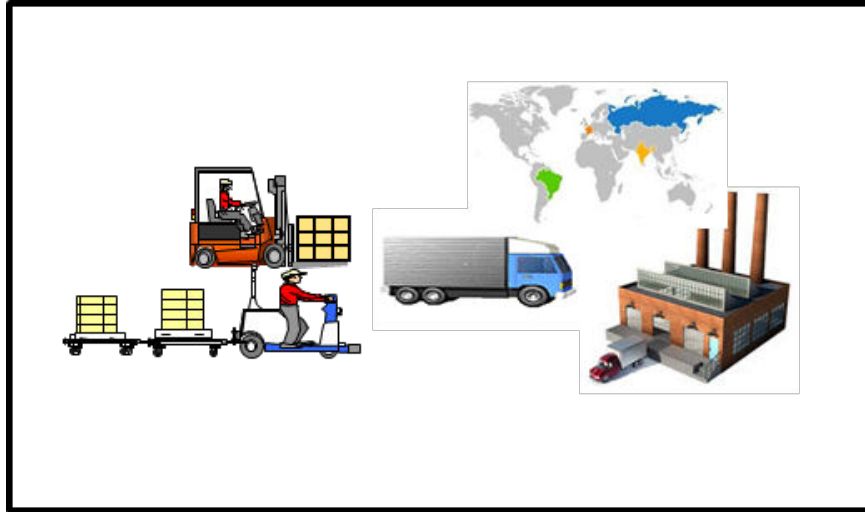


Figure 2.9 – La diversité processus

Une autre classification de la diversité a été introduite dans la littérature par (Staeblein, et al., 2011) à savoir, (1) **la diversité interne**, (2) **la diversité externe** et (3) **la diversité dynamique** :

- (1) **la diversité interne** désigne les diversités processus (Nouvelles technologies, gestion des stocks...) et techniques qui permettent de réaliser la diversité fonctionnelle exigée par le client.
- (2) **la diversité externe** traduit la partie de la diversité perçue par le client.
- (3) **la diversité dynamique** désigne, quant à elle, la fréquence avec laquelle de nouveaux produits arrivent sur le marché ainsi que les options offertes aux clients pour choisir leur produit.

Toutefois, c'est un grand défi que de produire une diversité de produits avec des ressources limitées. La diversité est ainsi source de **complexité**. En effet, plusieurs chercheurs se sont penchés sur la quantification de la complexité induite par la diversité du produit. Un résumé sur les causes de la complexité et de ses principales mesures fera l'objet des paragraphes suivants. Avant de traiter l'aspect de la complexité, nous proposons de présenter l'une des stratégies les plus utilisées en industrie pour faire face à la diversité, à savoir le concept de la différenciation retardée.

2.3.2 La différenciation retardée

Pour rationaliser leurs coûts de production et profiter d'une meilleure productivité, les fabricants standardisent leurs produits et processus en interne. Pour cela, ils cherchent à repousser le plus loin possible le point à partir duquel chaque produit acquiert sa propre identité,

ce qui est connu dans la littérature sous l'appellation de « **la différenciation retardée** » (Lee, et al., 1997).

Le concept de la différenciation retardée est de reconcevoir le produit ou le processus de production de telle façon que le point de différenciation soit retardé au maximum. Reporter le point de différenciation, implique que le processus ne va pas engager les en-cours dans un produit fini particulier, jusqu'à un point ultérieur (Voir figure 2.10).

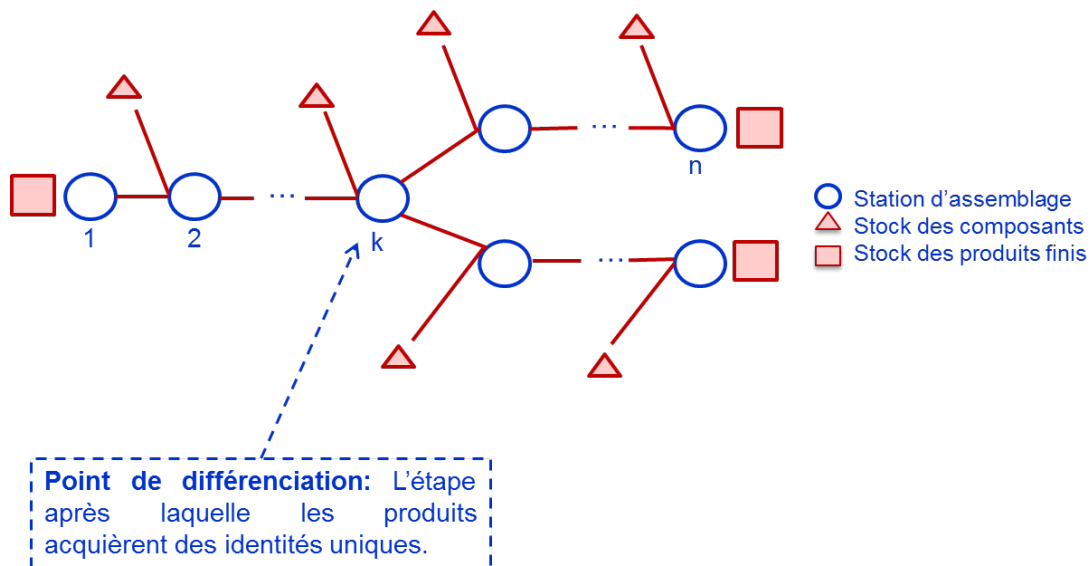


Figure 2.10 – Illustration du point de différenciation

Ce mode d'organisation permet d'obtenir un coût de fabrication bas (grâce à l'économie d'échelle et la mutualisation des risques) et un certain degré de personnalisation, pour tenir compte des besoins ou attentes spécifiques du client. Trois approches basiques de différenciation retardée ont été identifiées par (Lee, et al., 1997), qui sont la **standardisation**, la **conception modulaire** et la **restructuration des processus** (Voir figure 2.11).

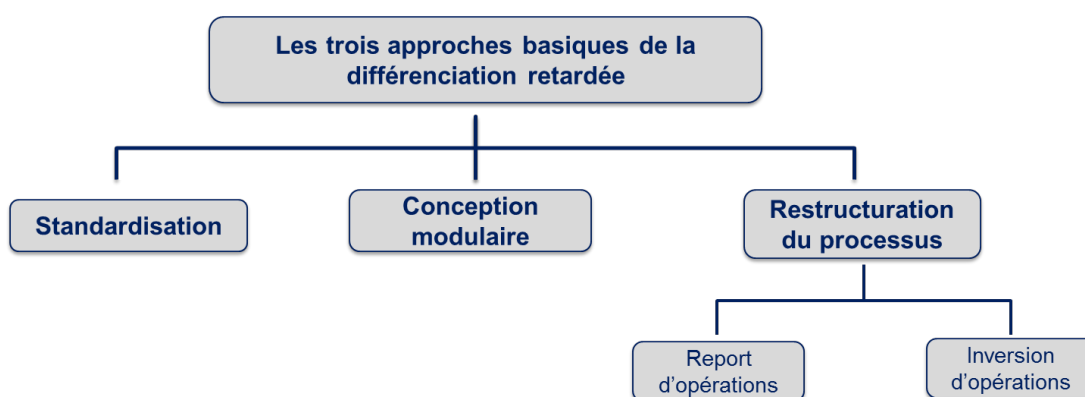


Figure 2.11 – Les trois approches basiques de la différenciation retardée

2.3.3 La complexité induite par la diversité du produit

La **complexité du produit** est définie par le fait que les pièces / sous-ensembles ont des attributs physiques qui causent des difficultés au cours de leur manutention et leur insertion

dans l'assemblage manuel ou automatique. Les principales sources de diversité qui conduisent à la complexité sont (Hu, et al. 2008) (Hu, et al., 2011) :

- Les fonctions basiques différentes au sein de la même famille de produits.
- L'adaptation de la même fonction à différentes exigences.
- Les fonctions optionnelles offertes.
- Les exigences non fonctionnelles.

Pour faire face à cette complexité, il faut modéliser comment la diversité du produit complice le processus et les opérations d'assemblage et par conséquent influence la performance du système. Pour caractériser la complexité causée par la diversité du produit dans des lignes d'assemblage à modèles mélangés, une mesure a été proposée par (Zhu, et al., 2008), appelée « *la complexité du choix de l'opérateur* ». Cette approche intègre à la fois la diversité du produit et des informations sur le processus d'assemblage.

On considère une station d'assemblage à modèles mélangés, j , et K activités d'assemblage. Pour la $k^{\text{ème}}$ activité, l'opérateur a besoin de choisir entre N_k variantes différentes. $q^k, v = 1, \dots, N_k$ représente la probabilité que la variante v soit sélectionnée à la $k^{\text{ème}}$ activité. La formule de la complexité du choix de l'opérateur est par conséquent, sous la forme suivante :

$$H_j^k = - \sum_{v=1}^{N_k} q_v^k \times \log_2 q_v^k \quad (2.1)$$

Un autre type de complexité a été introduit dans la littérature, à savoir **la complexité structurelle** d'un système. En effet, (Samy, et al., 2010) ont souligné l'importance de considérer un système de production, lui-même, comme un produit, qui a un cycle de vie, et dont la conception, la configuration, l'exploitation et la complexité devront être gérées :

$$C_M = \left[\frac{n_M}{N_M} + \bar{I}_M \right] [\log_2(N_M + 1)] \quad (2.2)$$

C_M : Complexité de la machine

N_M : Nombre total des machines d'assemblages

n_M : Nombre de machines d'assemblages uniques

\bar{I}_M : Indice de complexité moyenne des N_M machines d'assemblage

L'analyse de ces deux mesures de complexité sera faite dans le paragraphe suivant.

2.3.4 Synthèse

La littérature a permis de ressortir trois niveaux de diversité qui coexistent et se partagent la représentation du produit et du processus. Les industriels cherchent ainsi à mettre en avant la partie fonctionnelle de la diversité, qui représente la vraie valeur ajoutée perçue par le client, et à minimiser sa face cachée (la diversité processus et la diversité technique) pour maîtriser les coûts de production. Une analogie entre les deux approches de classification introduites par (Agard, et al., 2003) et (Staebelin, et al., 2011), nous a permis de ressortir les similitudes entre les différents types de diversités et de proposer la classification présentée dans la figure 2.12.

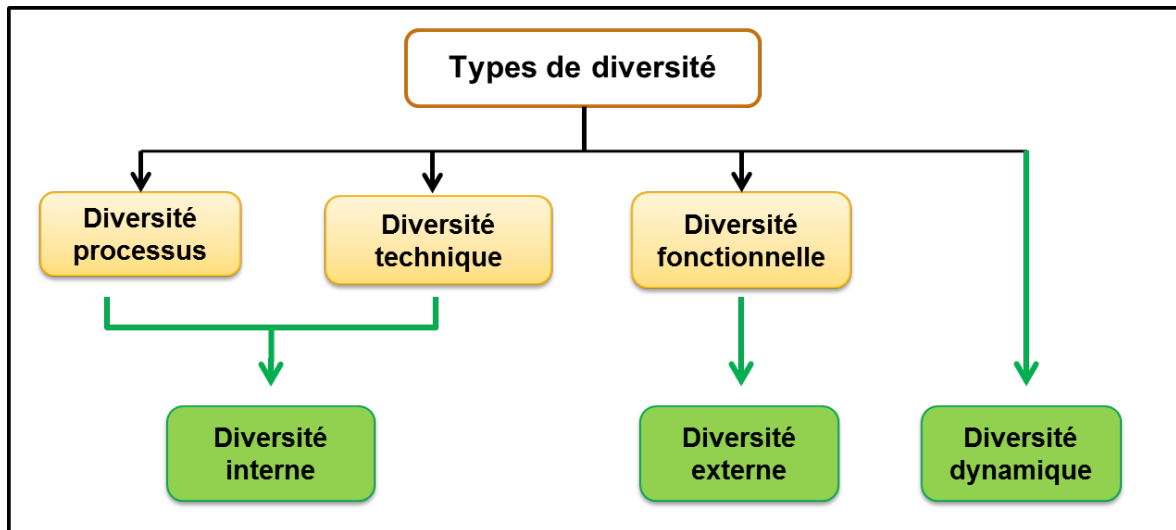


Figure 2.12 – Classification des types de diversité

Une gestion efficace de la diversité des produits peut fournir des avantages concurrentiels importants aux entreprises. Toutefois, la complexité induite par la diversité est importante et constitue un véritable frein à la flexibilité souhaitée. En effet, les mesures de complexité présentées auparavant permettent d’identifier des pistes de réflexion préliminaires pour notre sujet de recherche. En partant du fait que ce qui contribue à réduire la complexité du système de production pourrait augmenter sa flexibilité, nous en tirons les conclusions suivantes.

Tout d’abord, si on examine la mesure de la complexité du choix de l’opérateur, on se rend compte que la réduction du nombre de variantes facilite la tâche de l’opérateur et par conséquent réduit la valeur de la complexité, H_j^k (Voir équation 2.1). Cependant, la réduction du nombre de variantes revient à réduire la diversité technique. Réduire la diversité technique, quant à elle, pourrait se faire par l’une des approches basiques de la différenciation retardée, nous citons, par exemple, la standardisation ou la conception modulaire.

Ensuite, la deuxième mesure de complexité qui concerne la structure globale du système de production, fournit des informations sur la réduction de la diversité processus qui incluent les machines et les systèmes de manutention. En effet, la valeur de C_M (Voir équation 2.2) diminue si la diversité des machines d’assemblage est réduite, c. à d. si n_M est petit. Ces différentes constations ont contribué à l’identification de certains inducteurs de flexibilité, que nous présenterons plus en détail dans les chapitres 3 et 4.

Nous nous intéresserons dans les prochains paragraphes à la définition de la flexibilité et de ses différents types pour mieux se positionner par rapport aux travaux de la littérature.

2.4 Flexibilité des systèmes de production

2.4.1 Définitions

Dans la littérature, il y a plusieurs terminologies pour décrire la capacité des systèmes de production à répondre aux changements. Nous citons l’élasticité, l’agilité, l’adaptabilité et la sensibilité, qui sont généralement considérées en étroite relation avec la flexibilité.

Les expressions telles que les événements imprévus, les changements émergents, les options disponibles pour les adaptations, les possibilités de reconfiguration constituent la base com-

mune de la majorité des définitions de la flexibilité. Les définitions suivantes doivent donner une vue générale pour la compréhension de la flexibilité :

- **La flexibilité** est la capacité d'un système de s'adapter aux changements des données d'entrée, des conditions de bord et d'autres facteurs d'influence (Schafer, 1980).
- **La flexibilité** est la capacité du système à changer ou réagir avec une faible pénalité en termes de temps, d'effort, de coût ou de performance (Upton, 1994).
- **La flexibilité** décrit la capacité d'un système de production à s'adapter, en changeant les besoins dans les programmes des pièces et le processus technologique, sans effectuer de changement dans les éléments et la structure (Schmigalla, 1995).
- **La flexibilité** est définie comme étant la capacité qu'une organisation a, pour gérer la diversité des processus actuels et potentiels, ainsi que la rapidité avec laquelle ces processus peuvent être mis en œuvre afin d'accroître la capacité de gestion et d'améliorer le contrôle de l'organisation et de l'environnement (De Leeuw, et al., 1996).
- **La flexibilité** est une caractéristique de l'interaction entre un système de production et de son environnement. Dans ce cas, les fonctions de la flexibilité constituent un filtre qui isole le système des changements externes. Les changements externes sont caractérisés par leur ampleur, leur fréquence, leur niveau d'innovation et leur niveau d'incertitude. (De Toni, et al., 1998).
- **La flexibilité** traduit l'aptitude d'un système à répondre aux modifications de son environnement afin d'assurer le respect de ses objectifs (Erol, 1999).
- **La flexibilité** est la sensibilité d'un système de production aux changements. Un système est plus flexible, lorsqu'il est moins sensible aux changements qui surviennent dans son environnement (Chryssolouris, et al., 2013).

En outre, plusieurs termes sont apparus dans la littérature pour désigner la flexibilité. Cette variété d'appellations a participé à la création d'une sorte d'ambiguïté autour du concept de flexibilité. Il est donc nécessaire d'éclaircir tous ces termes pour positionner notre problématique et mieux cibler notre recherche bibliographique. Nous citons :

- **La reconfigurabilité**, « *reconfigurability* », est une caractéristique de la réactivité du système de production par rapport au marché, qui permet d'effectuer des changements au niveau des produits au moindre coût et délai. (Koren, 1999)
- **La capacité de basculement**, « *changeover ability* », désigne la capacité opérationnelle d'une seule machine ou poste de travail à effectuer des opérations particulières sur une pièce ou un sous-assemblage donné à tout moment avec un minimum d'effort et de temps. (Wiendahl, et al., 2007)
- **La transformabilité**, « *Transformability* », indique la capacité tactique d'une usine entière à passer à une autre famille de produits. Cela nécessite des interventions structurelles dans les systèmes de production et de logistique, dans la structure et les installations des bâtiments et dans la structure et le processus d'organisation. (Wiendahl, et al., 2007)

- **L'agilité**, « *agility* », représente la capacité stratégique globale de l'entreprise à générer un flux régulier de petites et grandes innovations dans les produits, les services, les solutions, et même les processus internes pour conquérir de nouveaux marchés et faire face à la concurrence. (Dyer, et al., 2006)
- **L'adaptabilité**, « *adaptability* », est la capacité des systèmes de production à s'adapter à l'évolution des environnements et de livrer la fonctionnalité prévue. (Schulz, et al., 1999)
- **La variabilité**, « *Changeability* », est définie comme étant la caractéristique qui permet de réagir très tôt, et de prévoir les ajustements nécessaires des structures et des processus de l'usine à tous les niveaux pour une meilleure performance économique. (Wiendahl, et al., 2007)

Nous constatons que les définitions de ces différents concepts sont plus ou moins proches les unes des autres. Néanmoins, elles ne sont pas équivalentes. Pour les différencier, une classification a été proposée par (Wiendahl, et al., 2007) en croisant cinq niveaux de la hiérarchisation du produit et cinq niveaux de structuration du système de production dans un même graphe, cinq classes de variabilité ont émergé (Voir figure 2.12).

Le plus haut niveau de structuration de production considéré est le **réseau**, (*network*), qui correspond à un ensemble de sites liés par des flux d'information ou reliés géographiquement par des moyens de transport. Un **site**, (*site*), décrit une unité de production qui traite plusieurs produits ; il est organisé en segments. Un **segment**, (*segment*), désigne généralement un atelier d'assemblage, d'usinage, une zone de gestion de stocks, etc. Une **cellule de travail**, (*cell*), représente un ensemble de ressources nécessaires pour le traitement d'une pièce, elle peut être répartie en une ou plusieurs **stations de travail** (*Station*). La hiérarchie des niveaux de produit commence par le haut avec le portefeuille de produits que l'entreprise met sur le marché. Ensuite, arrive le **produit**, (*Product*), ou la famille de produits. Le produit est généralement structuré en **sous-produits**, (*sub-product*), contenant des **pièces de fabrication**, (*work-piece*). Les pièces de fabrication, quant à elles, se composent d' **éléments**, (*features*).

Chaque classe de variabilité d'un niveau supérieur englobe les classes en dessous, comme illustré dans la figure 2.12. Quant au terme « adaptabilité », qui n'a pas été repris par (Wiendahl, et al., 2007) dans son étude, il a été utilisé dans plusieurs travaux comme un équivalent à la flexibilité (Bordoloi, et al., 1999) (Walker, et al. 2004) (Papakostas, et al., 2007) (Dombrowski, et al., 2014).

2.4.2 Types de flexibilité

Plusieurs typologies ont été proposées dans la littérature pour décrire la flexibilité. Les plus connues sont celles proposées par (Koren, 2010a) et (Chryssolouris, et al., 2013). En effet, (Chryssolouris, et al., 2013) ont identifié trois types de flexibilité, à savoir :

- **La flexibilité du produit** permet à un système de production de produire une diversité de types de pièces avec le même équipement. À court terme, cela signifie que le système a la capacité d'utiliser économiquement de petits lots pour s'adapter à l'évolution des demandes de différents produits. À long terme, cela signifie que l'équipement du système

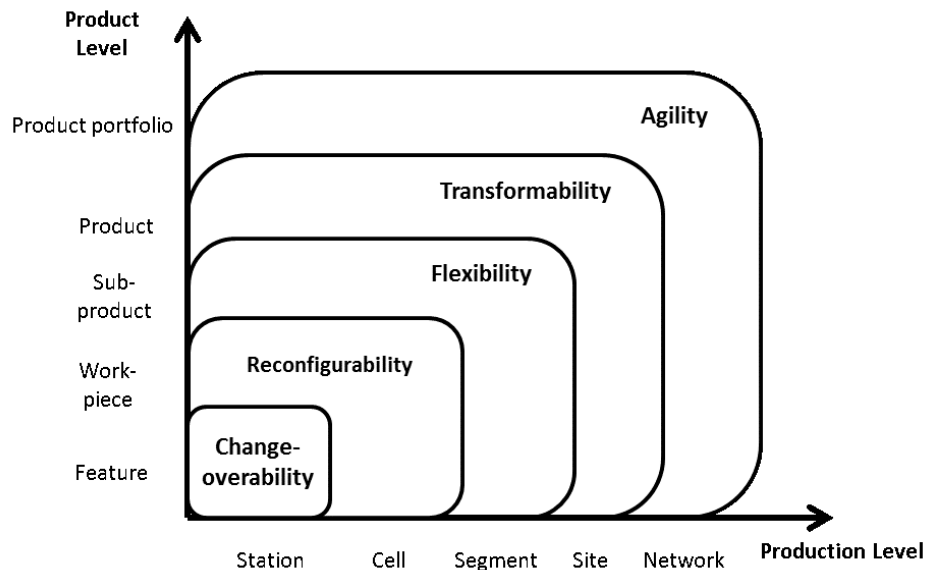


Figure 2.13 – Les niveaux de la variabilité (Wiendahl, et al., 2007)

peut être utilisé dans de multiples cycles de vie de produits et permet d'accroître par conséquent l'efficacité de l'investissement.

- **La flexibilité du volume** permet à un système de production de faire varier les volumes des différents produits pour faire face à la fluctuation de la demande, tout en étant rentable. Elle reflète la capacité du système de production à réduire ou augmenter son volume facilement.
- **La flexibilité du processus** traduit la capacité à produire un ensemble de produits à l'aide de différents machines, matériaux, opérations et séquences d'opérations. Il résulte de la flexibilité des processus et des machines, la flexibilité de la conception des produits et la flexibilité de la structure du système de production lui-même.

(Koren, 2010a), quant à lui, classe la flexibilité en seulement deux types, à savoir :

- **La convertibilité** qui exprime la possibilité de changer la fonctionnalité du système pour produire différents types de produits.
- **L'évolutivité** qui exprime la flexibilité du volume et est définie comme la possibilité de changer la capacité du système pour produire différents volumes de produits.

Des typologies supplémentaires ont été introduites mais sont rarement utilisées. Nous citons celle proposée par (De Toni, et al., 1998), qui classe la flexibilité en flexibilité de l'état, « State flexibility », qui est la capacité du système à continuer à fonctionner malgré les changements, ce qui permet le maintien de la stabilité. Et la flexibilité de l'action, « Action flexibility », qui permet au système de réagir aux changements d'une manière rapide et à moindre coût. Dans ce même contexte, (De Leeuw, et al., 1996) caractérise la flexibilité en deux niveaux ; dans le premier, il distingue entre une flexibilité interne et une flexibilité externe et au deuxième niveau, entre active et passive.

2.4.3 Conclusion

Nous reprenons le graphe présenté par (Wiendahl, et al., 2007), pour nous positionner par rapport aux différentes terminologies liées à la variabilité des systèmes de production. En effet, nous allons nous intéresser dans la suite de nos travaux à la ligne d'assemblage, qui correspond à la partie « segment » au niveau du système de production. Alors qu'au niveau de la hiérarchisation de la diversité du produit, nous nous intéresserons à l'étude des différents composants du produit, qui correspond, selon la définition donnée par (Wiendahl, et al., 2007), au « sub-product ». Le terme retenu est donc la flexibilité, comme illustré dans la figure 2.14.

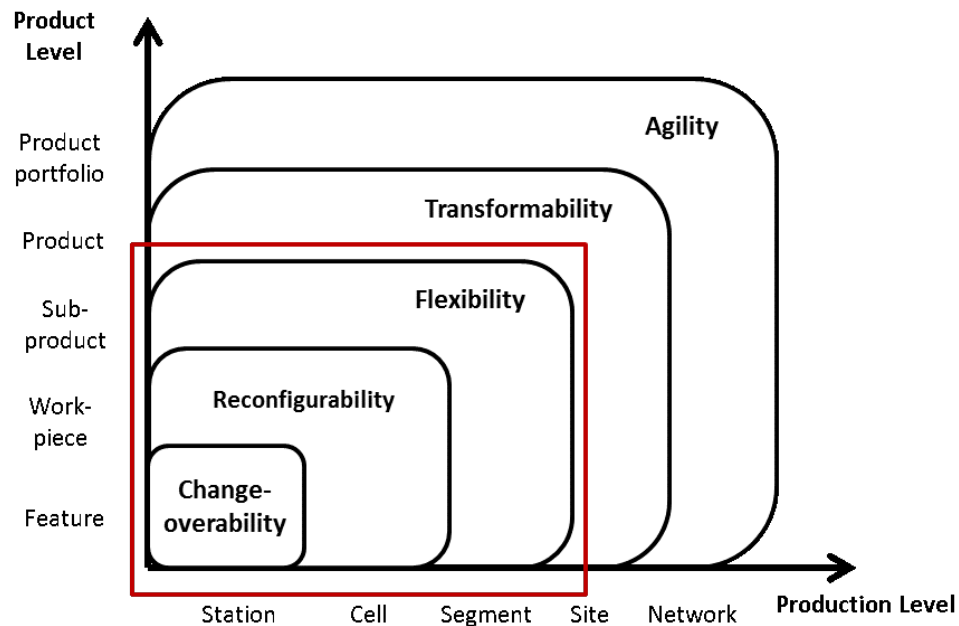


Figure 2.14 – Définition du périmètre de la problématique

Comme nous l'avons expliqué auparavant, plusieurs définitions ont été données à la flexibilité dans la littérature. En exploitant les différentes définitions, nous retenons la définition suivante :

« La flexibilité d'un système de production traduit la capacité des moyens de production à répondre aux variations de production en minimisant les coûts de production. ».

Les variations de production incluent des variations au niveau du volume, des variations au niveau des produits et des variations au niveau des processus. D'où la classification des types de flexibilité proposée par (Chryssolouris, et al., 2013). Cependant, notre problématique concerne l'introduction d'une nouvelle variante, par conséquent elle concerne les variations au niveau des produits et entraîne des variations au niveau des processus. Ces deux aspects représentent la convertibilité, telle qu'elle a été définie par (Koren, 2010a). Ainsi, **« la convertibilité d'un système de production traduit la capacité des moyens de production à répondre aux variations des produits et des processus en minimisant les coûts de production »**. En croisant les deux classifications données par Chryssolouris et Koren respectivement, nous dressons le schéma de la figure 2.15 qui regroupe les principaux types de flexibilité en se basant sur les trois types de variations précitées.

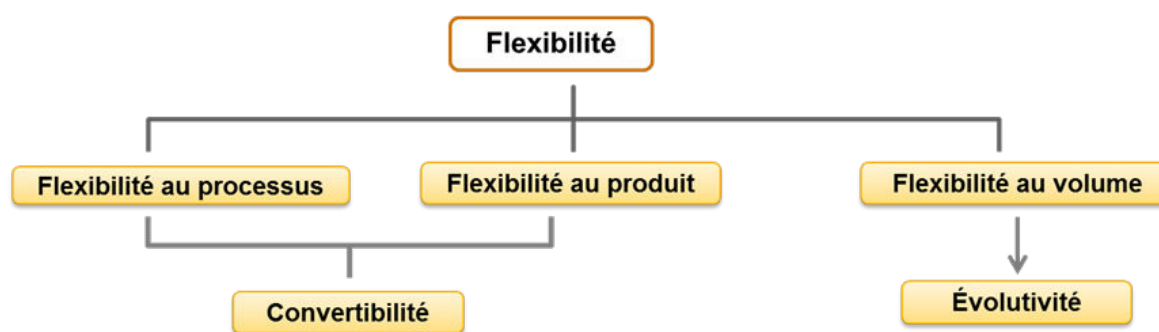


Figure 2.15 – Les types de flexibilité

Il est à noter que les variations au niveau des volumes, ce qui correspond à l'évolutivité, ne seront pas traitées dans ce travail de recherche.

2.5 Synthèse

La revue de la littérature scientifique a permis, d'une part, de délimiter le périmètre de notre contribution, et ainsi d'apporter un référentiel académique pour mieux positionner nos travaux de recherche. Le tableau 2.2 récapitule notre positionnement par rapport aux travaux antérieurs :

Le type de production	La personnalisation de masse
Le type de diversité considéré	La diversité technique et la diversité processus (Agard, et al., 2003) La diversité interne (Staeblein, et al., 2011)
La classe de variabilité considérée	La flexibilité (Wiendahl, et al., 2007)
Les types de flexibilité considérés	La convertibilité (Koren, et al., 2010a) La flexibilité au produit (Chryssolouris, et al., 2013) La flexibilité au processus (Chryssolouris, et al., 2013)

Tableau 2.2 – Positionnement par rapport à la littérature scientifique

Et d'autre part, de relever plusieurs points importants et pistes de réflexion, sur lesquels nous nous sommes basés pour l'élaboration de notre approche d'étude de la convertibilité d'un système d'assemblage automobile. Les principaux points relevés sont :

- L'ambiguïté autour du terme « flexibilité ». En effet, la flexibilité est un sujet de recherche

très complexe qui a occupé et occupe davantage les chercheurs et les industriels en vue de faire face aux fluctuations du marché. En outre, les multiples définitions et termes utilisés pour définir et caractériser la flexibilité ont participé à créer une grande ambiguïté autour du sujet. Une unification des termes utilisés et une délimitation claire du périmètre traité, permettrait de concentrer les efforts des chercheurs en vue de trouver des approches et des solutions efficaces à la problématique.

- Le caractère multidimensionnel de la flexibilité. En effet, pour aboutir à des résultats exploitables et proches de la réalité, plusieurs aspects doivent être pris en compte dans l'évaluation de la flexibilité. Ces aspects doivent faire intervenir à la fois, deux ou plusieurs types de flexibilité.
- Une étude de flexibilité unique et générique pour tous les systèmes de production n'est pas la meilleure solution. En effet, cette approche entraîne une sur-flexibilité non utilisée mais qui est payée par le consommateur. La tendance aujourd'hui est vers une flexibilité sur mesure, ajustée aux spécificités du système de production en question.
- Réduire la complexité permet d'augmenter la flexibilité du système de production. En effet, l'exploitation des mesures de complexité permettrait éventuellement de dégager certains leviers pour traiter la flexibilité du système de production.
- Approfondir les approches de différenciation retardée utilisées en industrie automobile permettrait d'avancer sur le traitement de notre problématique, notamment sur la standardisation des composants et la construction des familles de produits.

Au vue de ces conclusions, nous utiliserons le terme **convertibilité** pour désigner le type de flexibilité que nous souhaitons étudier. Nous procédons par la suite à une étude approfondie du système de production considéré, il s'agit dans notre cas d'un système d'assemblage automobile. En effet, le but du chapitre suivant est d'explicitier un cadre méthodologique autour du concept de la convertibilité d'un système d'assemblage automobile lors de l'introduction d'une nouvelle variante.

Chapitre **3**

Concept de la convertibilité d'un système d'assemblage automobile

L'objet de ce chapitre est de présenter le cadre de notre étude de convertibilité. En effet, il est nécessaire de bien définir et représenter un système d'assemblage automobile. Une meilleure analyse de celui-ci permettra d'identifier les principaux inducteurs pour évaluer sa convertibilité. Ce chapitre définit également le périmètre de l'étude ainsi que les hypothèses générales prises en compte dans la construction des indicateurs qui seront présentés dans le chapitre 4.

Sommaire

3.1	Introduction	47
3.2	Description de l'environnement du travail d'assemblage	47
3.2.1	Description d'un système d'assemblage automobile	47
3.2.1.1	Atelier de tôlerie	47
3.2.1.2	Atelier de peinture	48
3.2.1.3	Atelier d'assemblage	48
3.2.2	Ligne d'assemblage	48
3.2.2.1	Organisation de la ligne d'assemblage automobile	48
3.2.2.2	Tronçon d'assemblage	49
3.2.2.3	Pas de travail	50
3.2.2.4	Poste de travail	50
3.2.2.5	Graphe d'assemblage de référence	51
3.2.3	Conclusion	51
3.3	Description du véhicule automobile	52
3.3.1	Représentation du véhicule automobile	52
3.3.1.1	Famille de produits	52
3.3.1.2	Conception modulaire	53
3.3.2	Gestion de la diversité dans un atelier d'assemblage automobile	53
3.3.3	Conclusion	54
3.4	Concept de la convertibilité d'une ligne d'assemblage automobile	55
3.4.1	Présentation de la démarche	55
3.4.2	Présentation du concept AutoConvert	58
3.5	Périmètre de l'étude et hypothèses générales	60
3.5.1	Périmètre de l'étude	60
3.5.2	Hypothèses générales	60
3.6	Synthèse	61

3.1 Introduction

A partir de la problématique et du périmètre scientifique définis et décrits dans les chapitres précédents, nous proposons d'introduire, dans ce chapitre, notre approche pour l'évaluation de la convertibilité des systèmes d'assemblage. Il s'agit de traiter la première partie de nos objectifs que nous rappelons ici, visant à :

- Construire un concept autour de la convertibilité d'un système d'assemblage automobile afin d'établir les interactions existantes entre les éléments qui le composent.
- Définir les paramètres clés qui influent sur la convertibilité du système d'assemblage.

Nous avons constaté, à travers le chapitre précédent, que la gestion de la diversité constitue une difficulté majeure pour les industriels de par la complexité qu'elle induit au sein des systèmes de production. Notre démarche consiste à définir un système d'assemblage en se basant sur l'expérience industrielle en industrie automobile, d'une part, et à le caractériser, d'autre part, en se basant sur les résultats de la recherche scientifique en vue d'une éventuelle adaptation des modèles identifiés. En effet, les deux premières parties de ce chapitre font l'objet d'une description détaillée de l'environnement du travail d'assemblage à savoir la ligne d'assemblage automobile afin d'aboutir à une connaissance profonde du produit véhicule automobile tel qu'il est conçu aujourd'hui dans un contexte de variabilité continue. Dans la troisième partie, nous explicitons le concept de convertibilité du système d'assemblage automobile qui permettra par la suite de construire les indicateurs nécessaires à son évaluation. Enfin, la dernière partie de ce chapitre permettra de souligner le périmètre industriel de nos travaux ainsi que les différentes hypothèses qui seront prises en compte pour les modélisations mathématiques du chapitre 4.

3.2 Description de l'environnement du travail d'assemblage

3.2.1 Description d'un système d'assemblage automobile

Avant de procéder à la description de l'atelier d'assemblage, il est nécessaire de le situer dans le système de production automobile. En effet, une usine automobile est composée de trois grands ateliers (voir figure 3.1) :

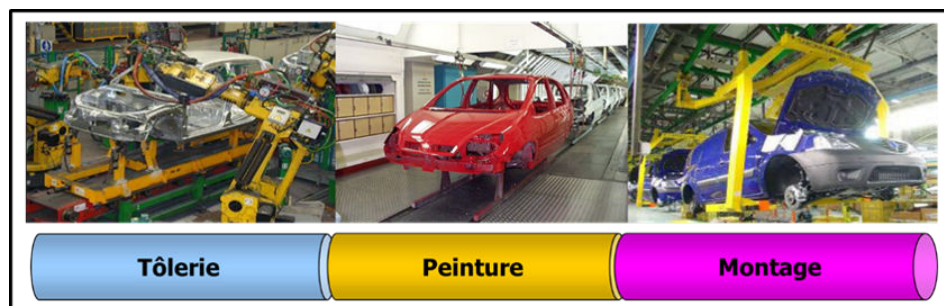


Figure 3.1 – Principaux ateliers d'un système de production automobile

3.2.1.1 Atelier de tôlerie

Cet atelier fabrique l'armature à partir des pièces embouties, puis assemble les éléments de la carrosserie (portes, capots, ...). La première partie de l'atelier est fortement automatisée. Des milliers de soudures sont nécessaires pour fabriquer la « caisse en blanc ». La deuxième

partie de l'atelier est moins mécanisée et des opérateurs interviennent pour ajuster les ouvriers.

NB : Un atelier d'emboutissage prépare en amont les pièces métalliques qui devront être assemblées sur un véhicule pour construire son armature, sa carrosserie et son châssis. Il transforme des bobines d'acier de différents tonnages, épaisseurs et largeurs en pièces embouties prêtes à être consommées par l'atelier Tôlerie. L'atelier d'emboutissage peut également être en charge de la préparation des pièces plastiques nécessaires à la fabrication du véhicule. Cet atelier n'est pas toujours présent sur les sites de production. Par conséquent, les sites disposant d'un atelier emboutissage fabriquent des pièces qui seront utilisées sur d'autres sites de production.

3.2.1.2 Atelier de peinture

Lorsque l'armature, les portes et le capot du véhicule sont assemblés, le véhicule subit plusieurs traitements à l'atelier peinture : traitement de surfaces (anti-gravillons, anti-corrosion, étanchéité), apprêts, laques et vernis. Cet atelier, pour faire des économies, doit réaliser des rafales de teintes, c'est-à-dire, enchaîner successivement des véhicules ayant la même teinte. En effet, un changement de teinte implique de devoir purger les circuits d'approvisionnement de la peinture et cela représente du temps et un coût non négligeables.

3.2.1.3 Atelier d'assemblage

L'atelier de montage (ou l'atelier d'assemblage, comme nous l'appellerons par la suite) est le plus complexe et le plus difficile à gérer. Le véhicule prend sa forme définitive et effectue son premier démarrage. Plusieurs pièces commandées (exemples : tableau de bord, sièges, boucliers. . .) y sont livrées pour être assemblées. Des assistances de montage sont présentes pour aider les opérateurs à réaliser les tâches pénibles. Et, contrairement aux deux précédents ateliers, la plupart des opérations se font manuellement. La qualité d'assemblage dépend des mains agiles des opérateurs qui peuvent s'adapter à différentes configurations. Les opérateurs sont également fortement impliqués dans le processus qualité. Chaque étape est soigneusement contrôlée pour réduire les défauts qualité qui pourront mener à une insatisfaction du client. Enfin, à l'extrémité de la ligne d'assemblage (appelé également le « bout du montage »), le véhicule démarre et subit un ensemble de contrôles. Puis, il est mis sur parc pour être expédié au client.

3.2.2 Ligne d'assemblage

Pour une meilleure appréhension de notre environnement de travail, à savoir l'atelier d'assemblage, nous avons effectué de nombreuses visites en usine en vue de construire notre propre analyse de celui-ci. Nous présentons dans la figure 3.2, les différents niveaux d'analyse identifiés à savoir, la ligne d'assemblage, le tronçon d'assemblage, le pas de travail et le poste de travail.

3.2.2.1 Organisation de la ligne d'assemblage automobile

La ligne d'assemblage est composée d'une ligne d'assemblage principale et de tronçons d'assemblage secondaires.

Les tronçons d'assemblage secondaires permettent de préparer et d'assembler les éléments complexes avant l'assemblage final sur le véhicule dans la ligne principale d'assemblage (exemples : GMP, Sièges, Poste de conduite, habillage des portes . . .).

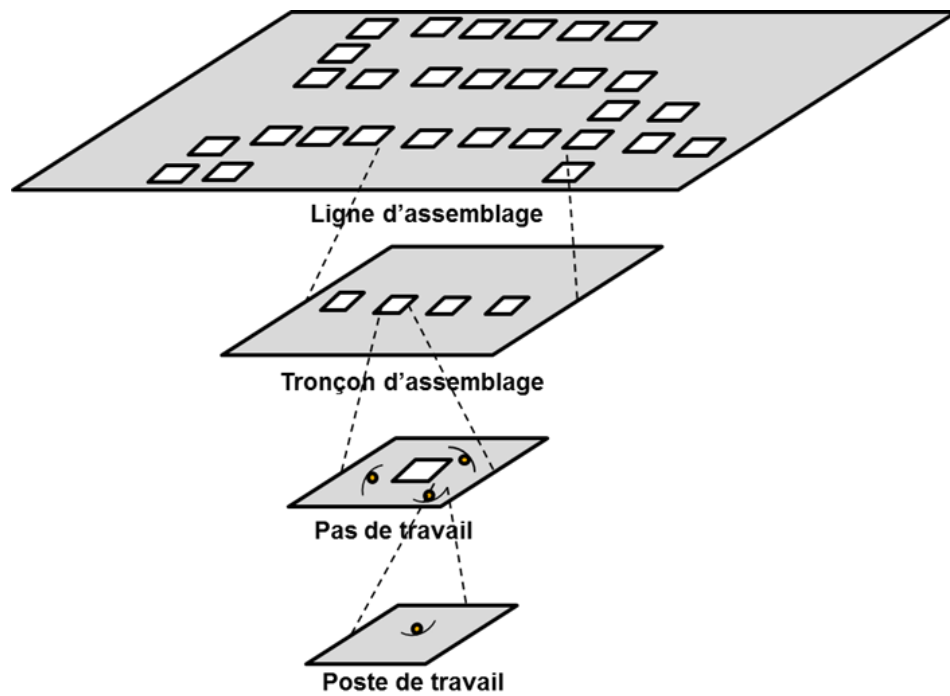


Figure 3.2 – Décomposition d'un atelier d'assemblage

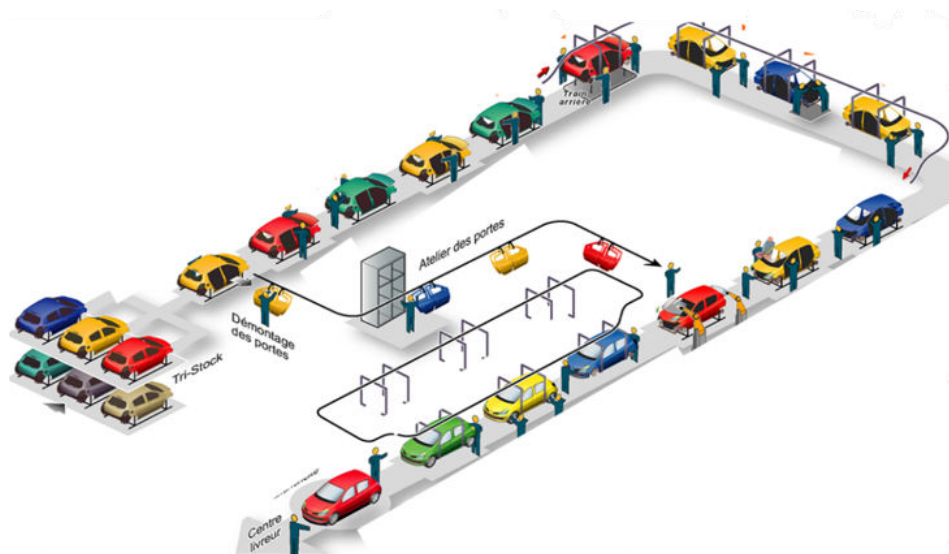


Figure 3.3 – Organisation d'une ligne d'assemblage automobile

La ligne principale d'assemblage est découpée en deux grandes parties :

- Habillage Caisse : Cette partie concerne l'assemblage des éléments structurels du véhicule comme la miroiterie et le poste de conduite.
- Assemblage Véhicule : Cette partie traite l'assemblage des éléments fonctionnels comme le moteur, les roues, les sièges.

3.2.2.2 Tronçon d'assemblage

Un tronçon d'assemblage est composé d'un nombre de pas de travail. On distingue les tronçons d'assemblage secondaires (appelés également les tronçons de préparation) et les tronçons

d'assemblage de la ligne principale. A la sortie de chaque tronçon secondaire, on obtient un assemblé ou un module qui sera utilisé dans l'assemblage final du véhicule (Plus de détails dans la partie III).

De manière générale, une ligne d'assemblage automobile est répartie en plusieurs tronçons d'assemblage (≈ 14 dans le cas des usines Renault). Cette répartition prend en compte la conception modulaire du véhicule automobile.

3.2.2.3 Pas de travail

Une ligne d'assemblage est découpée physiquement en pas de travail de longueur identique. Dans la ligne principale, un pas de travail a une longueur correspondant à l'écart entre l'avant de deux véhicules consécutifs. De chaque côté de la ligne d'assemblage sont disposées des zones de stockage. Ces zones servent à entreposer les outils fixes ou mobiles et les composants nécessaires à la réalisation des opérations d'assemblage (voir figure 3.4). Les opérations d'assemblage sont réparties sur les postes de travail jalonnant la ligne d'assemblage. L'opérateur évolue dans un espace de travail délimité pour qu'il puisse réaliser ses tâches sans gêner d'autres opérateurs.

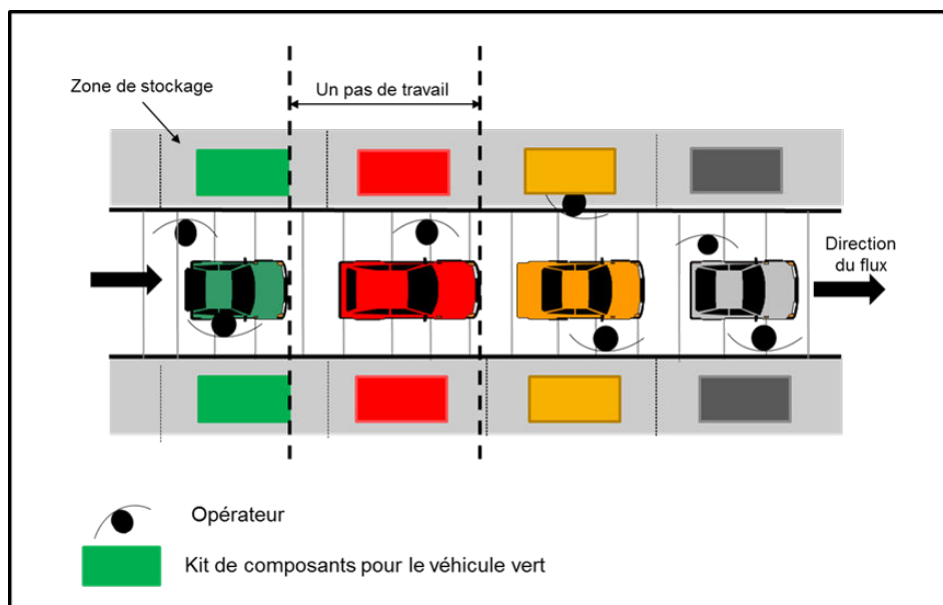


Figure 3.4 – Représentation d'un pas de travail

3.2.2.4 Poste de travail

Un pas de travail peut être composé d'un ou plusieurs postes de travail. Un poste de travail est un regroupement d'opérations. La totalité du travail à réaliser sur un poste est appelée la charge de travail de ce poste. Il peut être manuel, automatique ou semi-automatique. Les opérations d'assemblage sont de trois types, à savoir le vissage, le collage, le clipsage et les connexions électriques. La manutention du produit, à travers la ligne d'assemblage, peut se faire en automatique (ou semi-automatique), à travers un système de manutention. Elle peut être assurée également par l'opérateur (Si elle est en adéquation avec les règles ergonomiques du travail manuel).

3.2.2.5 Graphe d'assemblage de référence

Le graphe d'assemblage de référence représente le tracé de la ligne d'assemblage ainsi que l'enchaînement des différents tronçons d'assemblage. Il représente un standard pour les concepteurs des lignes d'assemblage, auquel toutes les usines doivent se conformer. En outre, il constitue également un standard pour les concepteurs du véhicule qui doivent le respecter en vue d'introduire les nouvelles variantes du véhicule avec le minimum de modifications dans la ligne d'assemblage. Cependant, le graphe d'assemblage de référence se doit également d'être convertible pour faire face aux évolutions technologiques et aux nouvelles réglementations, c.à.d. qu'il doit être capable de s'adapter aux nouvelles exigences liées à l'introduction d'un nouveau produit au moindre coût et délai.

3.2.3 Conclusion

La fabrication d'un véhicule automobile se fait généralement en trois grandes étapes à savoir la tôlerie, la peinture et l'assemblage final. De par la diversité des produits qu'elles traitent, les lignes d'assemblage automobile sont des lignes d'assemblage à modèles mélangés. Elles sont réparties en tronçons d'assemblage, chaque tronçon est découpé en pas de travail et chaque pas de travail est, à son tour, divisé en postes de travail (Voir figure 3.2).

Pour standardiser la conception de leurs lignes d'assemblage, les constructeurs automobiles disposent d'un graphe d'assemblage de référence, auquel doivent se conformer toutes les usines ainsi que les nouvelles variantes qui vont être introduites par la suite. Néanmoins, le graphe d'assemblage de référence évolue également à travers le temps avec l'évolution des technologies et des réglementations, ce qui fait que toutes les usines ne sont pas toujours conformes aux standards suivant leur année de création.

La diversité des produits dans une ligne d'assemblage pourrait impacter l'ensemble des niveaux d'analyse identifiés (voir figure 3.2). Ainsi, la diversité au niveau de la ligne d'assemblage est illustrée par la diversité des véhicules. Au niveau du tronçon, la diversité est caractérisée par la diversité des assemblés/ modules à la sortie de chaque tronçon. La diversité au niveau du pas de travail est représentée par la diversité des composants à assembler sur chaque véhicule. Enfin, au niveau du poste de travail, elle est illustrée par la diversité des machines, des outils ou des opérations réalisées par l'opérateur (Voir tableau 3.1).

Par conséquent, l'introduction de nouvelles variantes de produits n'est pas toujours possible sans engendrer des modifications sur la ligne, d'où le besoin d'indicateurs permettant d'évaluer le degré de convertibilité des lignes d'assemblage existantes. Pour répondre à ce besoin, il est indispensable d'analyser le produit automobile et son interaction avec la ligne d'assemblage, ce qui fera l'objet des prochains paragraphes.

Atelier d'assemblage	Caractérisation de la diversité
Ligne d'assemblage	La diversité des véhicules (caisses peintes)
Tronçon d'assemblage	Diversité des assemblés
Pas de travail	Diversité des composants
Poste de travail	Diversité des machines/ outils/ opérations

Tableau 3.1 – Caractérisation de la diversité en atelier d'assemblage automobile

3.3 Description du véhicule automobile

3.3.1 Représentation du véhicule automobile

Pour faciliter le traitement de la diversité dans les lignes d'assemblage à modèles mélangés, les industriels ont recours à plusieurs stratégies, dont les principales sont la construction des familles de produits et la conception modulaire.

3.3.1.1 Famille de produits

Le concept de famille de produits et famille de pièces est fondamental pour le paradigme de la personnalisation de masse. Une famille se compose d'un groupe de produits ou de pièces basé sur un concept de conception spécifique, ou dérivé d'un produit parent standard, et sont similaires dans la conception et / ou les méthodes de production (ElMaraghy, et al., 2013). Regrouper des variantes similaires dans une même famille facilite la conception et la production de celles-ci. En effet, tous les produits de la même famille possèdent les mêmes fonctionnalités de base, et jouent essentiellement le même rôle.

La conception d'une famille de produits nécessite la détermination de la base commune du produit, c. à d. les composants communs de la famille de produits et la formulation des variantes du produit qui sont composées de composants communs et de composants spécifiques (Koren, 2010) (voir figure 3.5). Augmenter le nombre de combinaisons possibles autour d'une même famille de produits permet de partager certains coûts fixes pour les variantes de produits qui la composent.

Plusieurs approches ont été introduites dans la littérature pour créer des familles de produits en se basant sur la conception modulaire du produit (Simpson, et al., 2001) (Jose, et al., 2005).

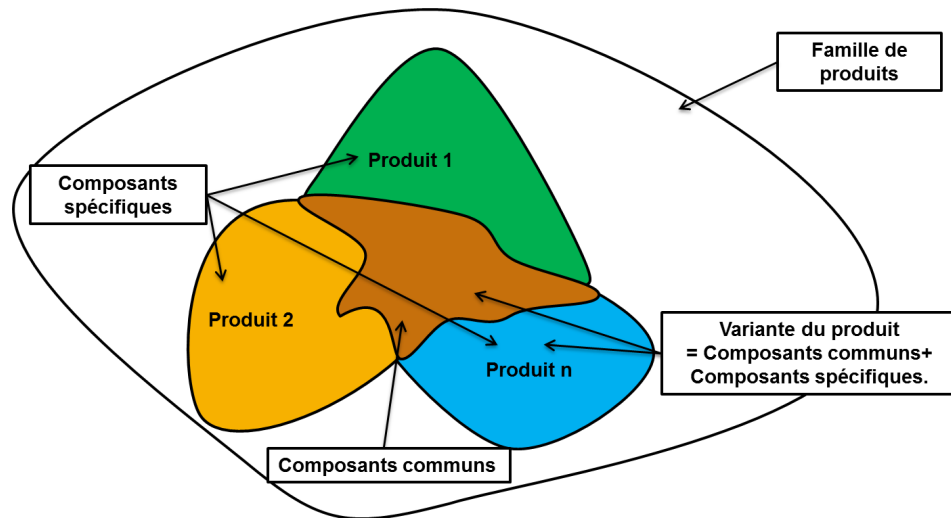


Figure 3.5 – Définition d'une famille de produit

3.3.1.2 Conception modulaire

La modularité du produit nécessite de développer une plateforme du produit sur laquelle les produits modulaires peuvent être construits. Un module est une unité dont les éléments structurels sont fortement interconnectés, et faiblement connectés aux éléments des autres assemblés / modules. Un module peut également être changé et remplacé facilement et produit de façon indépendante pour un montage ultérieur. Les différentes combinaisons des modules conduisent à différencier le produit principal en variantes (AlGeddawy, et al., 2013). L'architecture de conception modulaire permet le développement rapide de nouveaux produits en utilisant des modules de remplacement. Les modules communs peuvent être partagés par différents produits, réduisant ainsi le temps de conception et le coût (Xu, et al., 2005)(Warburton, 99) (Mons, et al., 2010b) (Mons, et al., 2010a).

Les équipementiers automobiles donnent la définition générale suivante pour les modules : *” Un groupe de composants, physiquement proches les uns des autres qui sont à la fois assemblés et testés à l'extérieur des installations et peuvent être assemblés très simplement sur le véhicule ”* (Sako, et al., 1999). En outre, les modules sont différenciés en des modules de « caisse en blanc » qui comprennent exclusivement les éléments structurels et en « des modules d'assemblage » qui contiennent des éléments supplémentaires et sont introduits dans le véhicule lors de l'assemblage final (Bruggemann, 2006).

3.3.2 Gestion de la diversité dans un atelier d'assemblage automobile

Après avoir défini le produit automobile et la manière avec laquelle est organisée la famille qu'il compose, nous présentons dans ce paragraphe les différents termes pour caractériser la diversité des produits automobiles qui vont être utilisés par la suite dans le développement des indicateurs de la convertibilité.

Dans une ligne d'assemblage automobile, on peut classer les éléments constituant le produit automobile comme suit :

- D'un point de vue de la conception :
 - **La pièce** : elle représente l'élément indivisible qui rentre dans la composition du

produit.

- **L'assemblé** : il représente un ensemble de pièces assemblées formant une seule entité. L'assemblé pourrait être réalisé d'un point de vue fonctionnel dans le cas des modules.
 - **Le produit** : il représente le résultat final de l'assemblage de l'ensemble des pièces et des assemblés.
- D'un point de vue de la gestion :
 - **Le composant** : il représente l'entité qui rentre dans une ligne d'assemblage, qu'il s'agisse d'une pièce ou d'un assemblé.

Les pièces peuvent être directement assemblées sur la ligne principale ou passer par des tronçons secondaires pour former des assemblés. Dans les deux cas, une fois arrivés sur la ligne principale, nous considérons les pièces et les assemblés comme des composants, car on leur attribue une seule référence en usine. Pour une meilleure gestion des stocks, ces composants sont classés en familles suivant des critères de similarités prédéfinis. Nous considérons que la ligne d'assemblage est une entité indépendante, toute commande provenant du fournisseur et qui entre dans le système, est classée sous une seule référence, qu'elle soit une pièce ou un assemblé. Par conséquent, sur la ligne d'assemblage, peuvent transiter des composants (Provenant directement du fournisseur) et des modules ou assemblés (Assemblés dans les tronçons secondaires)(Voir figure 3.6).

Dans la suite de nos travaux, nous désignons par famille de composants la famille de pièces ou d'assemblés qui arrive dans un tronçon d'assemblage donné pour traitement.

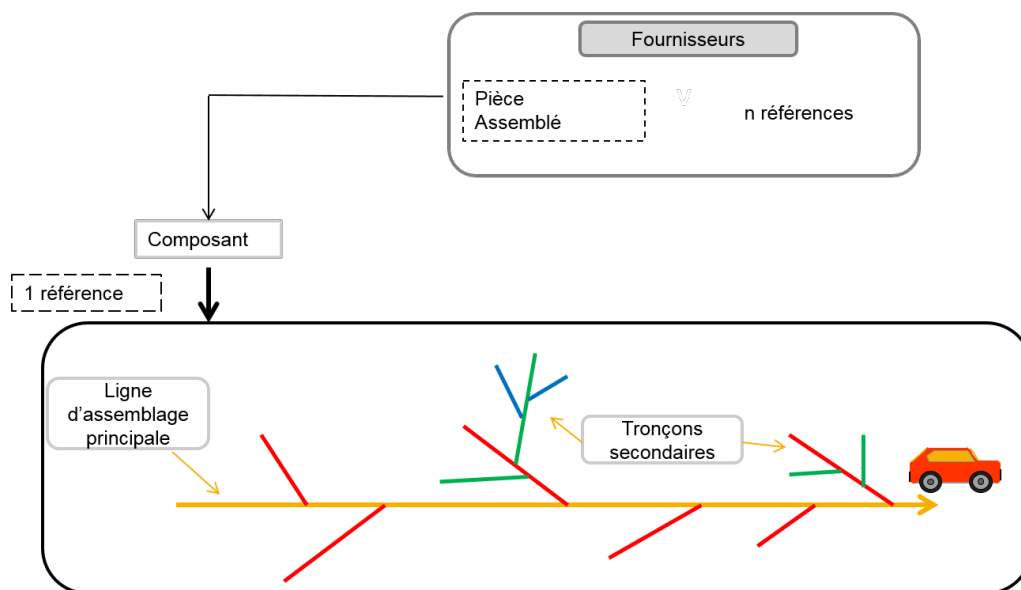


Figure 3.6 – Gestion des composants dans une ligne d'assemblage automobile

3.3.3 Conclusion

Pour rationaliser leurs coûts de production, les industriels ont recours à plusieurs stratégies pour gérer la diversité des produits, dont les principales sont la construction des familles de

produits et la conception modulaire. Ils cherchent ainsi à mettre en avant la partie fonctionnelle de la diversité, qui représente la vraie valeur ajoutée perçue par le client, et à minimiser sa face cachée, à savoir la diversité processus et la diversité technique (Voir chapitre 2). En se basant sur les trois éléments qui composent le produit automobile, à savoir, la pièce, l'assemblé et le produit, nous proposons dans la figure 3.7, une hiérarchisation de la diversité en l'illustrant avec un exemple du constructeur automobile Renault. Aussi, nous avons croisé, dans ce même graphe, l'organisation de la ligne d'assemblage présentée dans la figure 3.2, pour situer la diversité à tous les niveaux identifiés, à savoir la ligne d'assemblage, le tronçon d'assemblage, le pas de travail et le poste de travail.

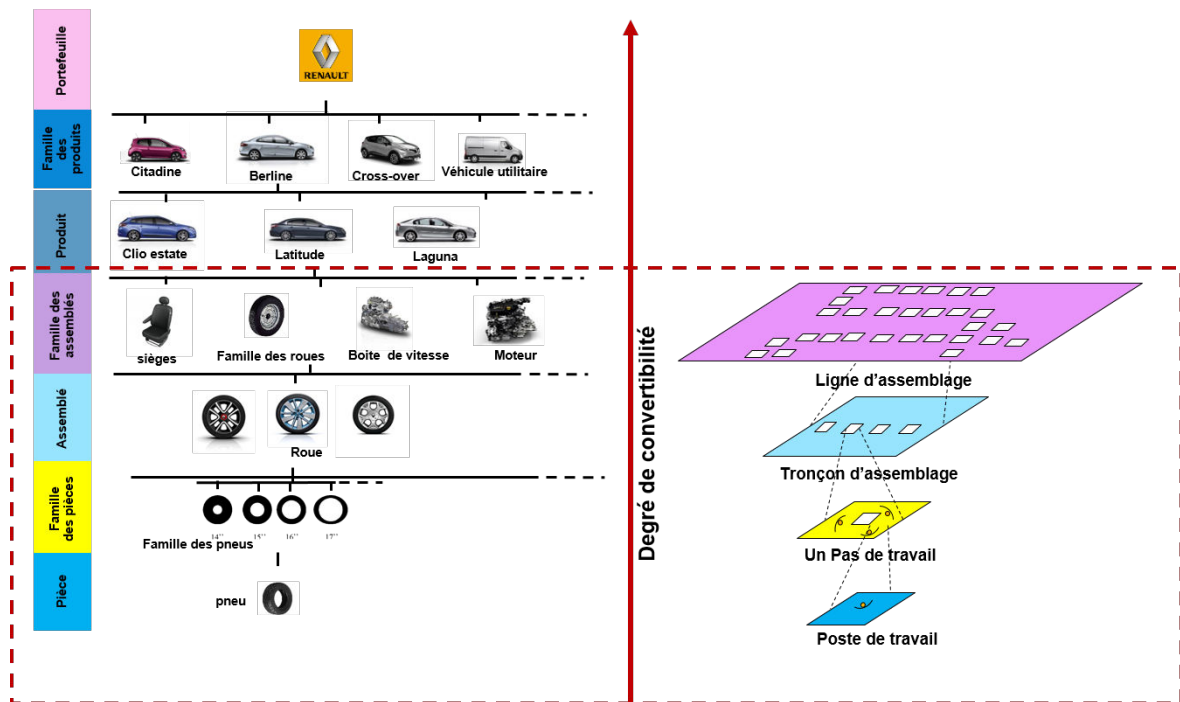


Figure 3.7 – Illustration de la diversité au niveau de la ligne d'assemblage

Le portefeuille représente l'ensemble des modèles proposés sur le marché par un constructeur donné. Les familles de produits sont classées par segments ou catégories de voitures. Ces derniers sont en général catégorisés en fonction de la taille ou de l'usage du véhicule. Ainsi, pour un segment donné (Berline dans notre exemple), plusieurs modèles sont proposés (Clio estate, Latitude...). L'impact de la diversité sur la ligne d'assemblage dépend du niveau de la hiérarchisation qu'elle touche. Par exemple, une diversité au niveau de la famille des produits requière d'importantes modifications par rapport à une diversité introduite au niveau de la famille des pièces et nécessite, par conséquent, un plus haut degré de convertibilité.

3.4 Concept de la convertibilité d'une ligne d'assemblage automobile

3.4.1 Présentation de la démarche

Pour pouvoir proposer un indicateur de convertibilité robuste, il est nécessaire de procéder à une analyse profonde du système d'assemblage pour le modéliser et identifier les paramètres

clés qui influent sur sa convertibilité. Par conséquent, de nombreux travaux ont été développés dans le passé pour définir les méthodologies de description, d'analyse et de conception de celui-ci.

Nous définissons un système de production, et plus particulièrement un système d'assemblage, comme **un ensemble de RESSOURCES qui permettent de réaliser une transformation selon un PROCESSUS pour obtenir un PRODUIT**. Un système d'assemblage est alors composé de trois éléments principaux, à savoir les ressources, les produits et les processus. Ces trois éléments sont étroitement liés. En effet, l'introduction d'une nouvelle variante dans le système d'assemblage pourrait avoir un impact à la fois sur les ressources, les produits et les processus déjà en place.

Ce point de vue est controversé dans la littérature. (Tolio, et al., 2010) caractérisent, ce que nous appelons maintenant la convertibilité du système de production, par la considération des produits, des processus et du système de production existant, car dans leur approche ils veulent mettre en avant l'aspect dynamique de la convertibilité et son évolution dans le temps. Alors que (Maier-Sperdelozzi, et al., 2003) ne considèrent que les processus et les ressources dans leur approche, car ils traitent la convertibilité potentielle de la conception initiale d'un système de production avant l'arrivée d'une perturbation, c. à d. avant l'introduction d'une nouvelle variante du produit. Pour notre approche, nous allons considérer les processus, les produits et les ressources car, d'une part, nous travaillons dans un environnement déterministe et d'autre part, nous voulons mettre en avant l'impact de l'introduction d'une nouvelle variante sur l'aspect technologique physique de la ligne d'assemblage.

Le tableau 3.2 résume notre vue de la convertibilité du système d'assemblage en la comparant à d'autres travaux de la littérature.

	Produits	Processus	Ressources	Système de production	
(Lafou, et al., 2016)(Environnement déterministe, aspect technologique physique)	X	X	X		
		X	X		(Maier-Sperdelozzi, et al., 2003) (Conception initiale en amont du produit)
		X	X	X	(Tolio, et al., 2010) (Aspect dynamique)

Tableau 3.2 – Caractérisation de la convertibilité d'un système d'assemblage

Pour évaluer la convertibilité d'un système d'assemblage quant à l'introduction d'une nouvelle variante, deux cas se présentent. Le premier cas concerne l'absorption totale de la diversité introduite par le système de production existant ; dans ce cas, la diversité introduite pourrait

être qualifiée d'**une diversité transparente**. Le second cas, qui est le plus fréquent, est quand la nouvelle variante nécessite des modifications sur la ligne existante avant de lancer sa production ; dans ce cas, nous proposons d'évaluer la convertibilité en examinant les interactions des trois éléments identifiés, deux par deux, comme illustré dans la figure 3.8.

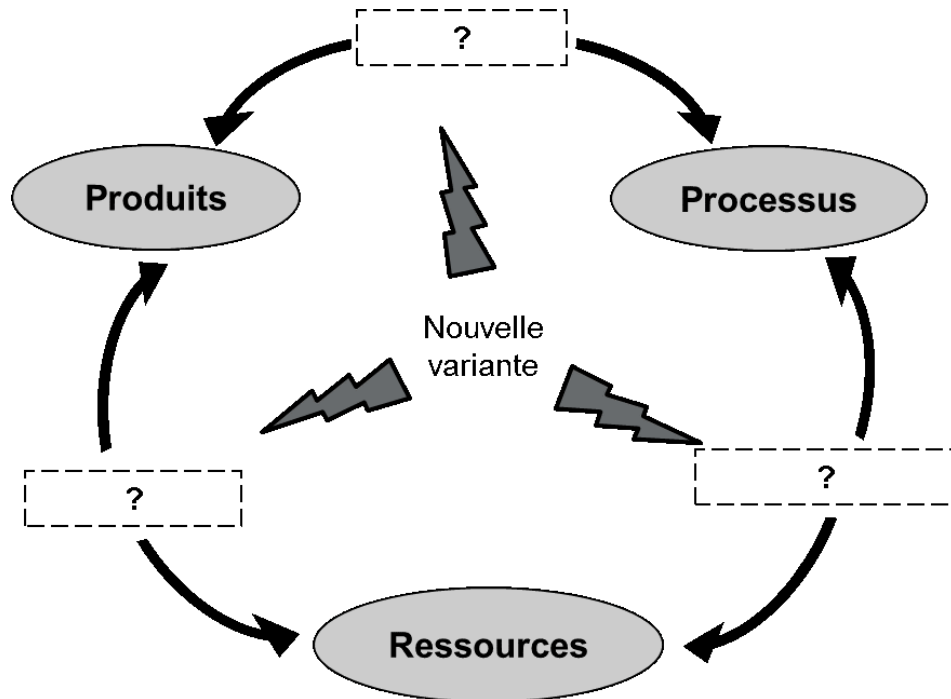


Figure 3.8 – Éléments caractérisant la convertibilité d'un système d'assemblage automobile

Pour mieux comprendre l'impact qu'une nouvelle variante a sur une ligne d'assemblage, nous avons examiné l'historique des usines Renault en vue d'identifier les paramètres clés qui traduisent l'ampleur des travaux d'adaptation effectués sur les lignes avant de lancer la nouvelle variante. En se basant sur le coût des investissements engagés, deux principales causes sont ressorties, à savoir l'ajout de pas de travail et l'adaptation des moyens d'assemblage (ressources).

En croisant ces premiers résultats, nous déduisons que les interactions qui contiennent l'élément Ressources, à savoir l'interaction Processus – Ressources et l'interaction Produits – Ressources, font intervenir l'aspect technologique physique des moyens.

En outre, l'ajout de pas de travail modifie la configuration de la ligne d'assemblage. Nous définissons la configuration d'une ligne d'assemblage comme l'arrangement des pas de travail et les connections entre eux. Si un changement au niveau de la configuration est nécessaire cela traduit nécessairement un changement au niveau du processus. Par conséquent, la configuration est un paramètre clé qui caractérise la convertibilité au niveau de l'interaction Processus – Ressources. De la même manière, l'interaction Produits – Ressources est caractérisée par les moyens utilisés pour l'assemblage du produit. Le terme « moyens » englobe tous les éléments qui sont en contact direct avec le produit, à savoir les outils de fixation (que nous appellerons, par la suite, interfaces outils) et les interfaces de posage ou de préhension des différents composants. En effet, ce sont ces interfaces qui facilitent, ou non, l'absorption de la diversité des composants lors des opérations d'assemblage. Par conséquent, nous allons considérer ce paramètre pour caractériser l'interaction Produits – Ressources (Voir figure 3.9).

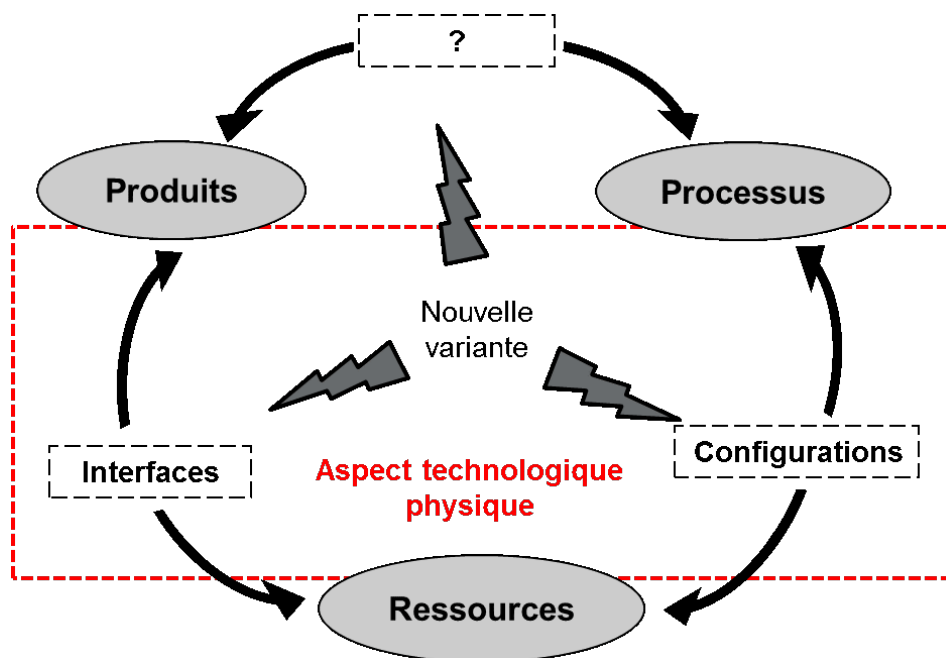


Figure 3.9 – Aspect technologique physique de la convertibilité d'un système d'assemblage automobile

Par ailleurs, l'élément Ressources n'intervient pas au niveau de l'interaction Produits – Processus, car celle-ci décrit un aspect logique. En effet, cet aspect ne ressort pas directement dans les documents de chiffrage examinés, car ceux-ci mettent en avant les coûts d'investissement liés aux modifications physiques dans les lignes d'assemblage lors de l'introduction d'une nouvelle variante. Or, un produit qui n'a pas le même processus d'assemblage que la famille de produits existante va nécessairement impacter la convertibilité de la ligne d'assemblage. Par conséquent, nous proposons de caractériser l'interaction Produits - Processus par la séquence d'assemblage (Voir figure 3.10). En effet, celle-ci permet d'évaluer la capacité de la ligne d'assemblage à absorber des modifications au niveau des processus. Ainsi, nous définissons une séquence d'assemblage comme l'ensemble des opérations ordonnées nécessaire pour l'assemblage du produit.

3.4.2 Présentation du concept AutoConvert

Le grand nombre d'éléments qui caractérisent une ligne d'assemblage à modèles mélangés rend difficile l'évaluation de sa convertibilité. Notre approche a consisté à réduire le nombre de paramètres considérés en ne retenant que ceux qui ont un impact important sur la convertibilité de la ligne d'assemblage. Nous avons évalué l'importance de l'impact des paramètres retenus en se basant sur l'historique des modifications effectuées sur un ensemble d'usines d'assemblage automobile. En effet, cette approche permettra de réduire le temps de traitement et le volume de données nécessaires pour l'application des indicateurs de convertibilité qui seront introduits dans le chapitre 4. Par conséquent, nous avons explicité le concept de la convertibilité d'une ligne d'assemblage automobile en caractérisant les interactions entre les trois éléments la composant, à savoir les produits, les processus et les ressources. Nous proposons de baptiser le concept introduit AutoConvert, en référence à l'assemblage automobile et à la convertibilité

(Voir figure 3.11).

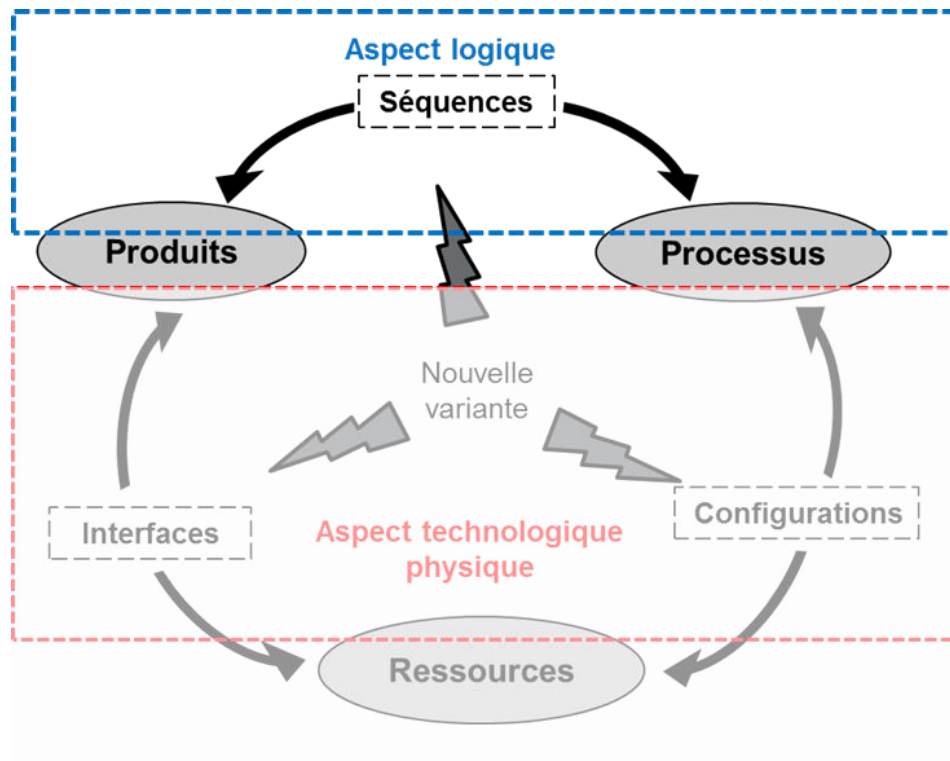


Figure 3.10 – Aspect logique de la convertibilité d'un système d'assemblage automobile

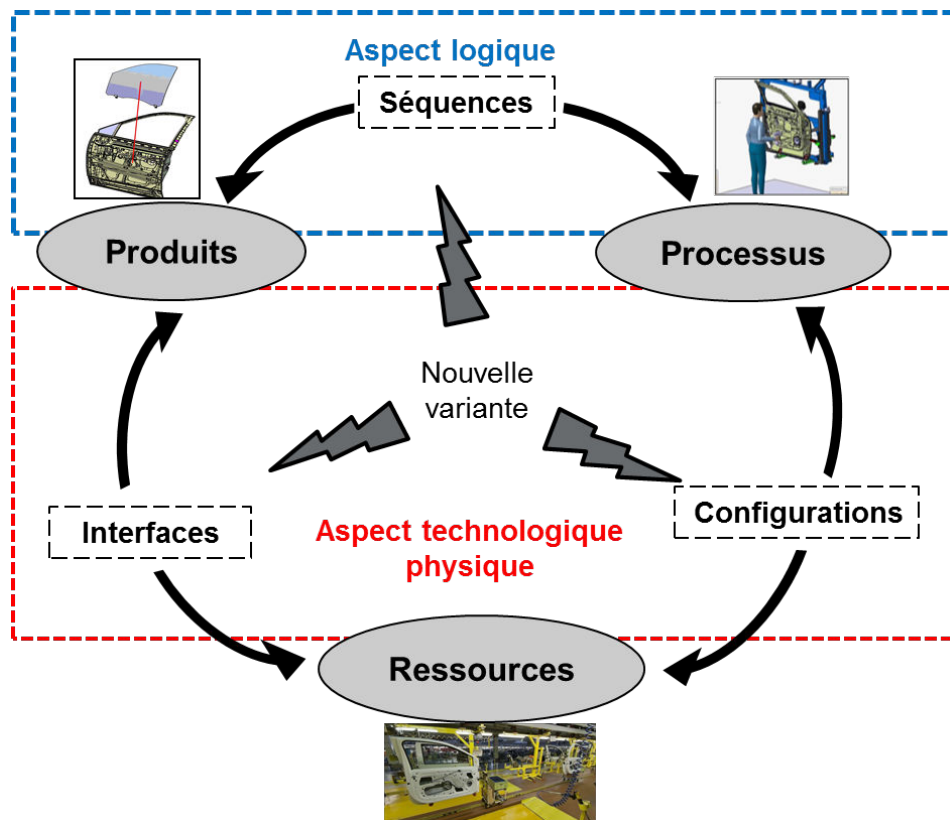


Figure 3.11 – AutoConvert : Convertibilité d'un système d'assemblage Automobile

Nous définissons les interactions d'AutoConvert comme suit :

- **L'interaction Produits – Processus.** Au niveau de cette interaction, le séquençage des étapes de transformation de la nouvelle variante peut différer des séquences existantes. Par conséquent, la convertibilité à ce niveau sera évaluée selon la capacité des séquences existantes à incorporer les nouvelles étapes de transformation potentielles et/ou les nouvelles contraintes de précédence.
- **L'interaction Processus – Ressources.** A ce niveau, l'importance est donnée au nombre de pas de travail exigés par le nouveau processus et à leur disposition. La convertibilité sera ainsi évaluée suivant la capacité de la configuration existante à gérer les pas de travail supplémentaires nécessaires.
- **L'interaction Produits – Ressources.** L'accent est mis au niveau de cette interaction sur les interfaces entre les ressources et les produits. Il s'agit des interfaces physiques qui décrivent les surfaces de contact entre les produits et les ressources, que ce soit avec le système de manutention (les interfaces de posage et de préhension), ou avec les machines et les visseuses (les interfaces - outils). La convertibilité à ce niveau est évaluée selon la capacité des interfaces existantes à absorber la diversité des composants.

3.5 Périmètre de l'étude et hypothèses générales

Après avoir identifié les principaux leviers de la convertibilité du système d'assemblage automobile, la prochaine étape consistera en la construction d'indicateurs pour l'évaluer. Pour cela, nous présentons dans le présent paragraphe le périmètre de l'étude et les hypothèses générales considérées quant à l'applicabilité des indicateurs de convertibilité qui seront introduits dans le chapitre 4.

3.5.1 Périmètre de l'étude

Dans la construction des indicateurs de convertibilité, les points suivants délimitent le périmètre de notre étude :

- L'environnement considéré est un environnement déterministe. En effet, les données sur les variantes du produit à introduire ainsi que les lignes d'assemblage à évaluer, sont connues.
- Les indicateurs proposés prennent en compte des tronçons d'assemblage. L'étude pourrait être généralisée de la même manière sur l'ensemble de la ligne d'assemblage.
- Les indicateurs proposés pourraient ne pas s'appliquer sur d'autres systèmes d'assemblage du fait qu'il s'agisse d'une étude de convertibilité sur mesure (voir chapitre 2) qui intègre des données spécifiques à l'industrie automobile.

3.5.2 Hypothèses générales

Après avoir délimité le périmètre de notre étude, nous présentons ci-après les hypothèses générales considérées :

- La comparaison de la convertibilité des tronçons d'assemblage se fait à cadence égale. En effet, les ajouts de pas de travail/ des changements dans les séquences d'assemblage qui sont dus à des augmentations de capacité de production ne seront pas considérés.
- L'étude ne prend pas en compte le taux de défaillance des équipements. Elle est réalisée sous réserve que les équipements sont 100% disponibles.
- L'étude ne prend pas en compte le taux de défaillance des systèmes logistiques. Elle est réalisée sous réserve que les composants sont 100% disponibles.
- L'étude ne remet pas en cause la conception des produits et des lignes d'assemblage existantes.
- L'élément Ressources qui entre dans la modélisation du système d'assemblage ne prend pas en considérations la main d'œuvre. En effet, nous considérons que l'opérateur est 100% convertible de par le seuil de complexité cognitive qui est respecté.

Il est à noter que le choix d'affecter une nouvelle variante à une usine dépend aussi d'objectifs de présence sur les marchés ; par conséquent, l'impact économique de la convertibilité, aussi favorable soit il, n'est pas le seul critère de choix.

3.6 Synthèse

Le présent chapitre avait pour principal objectif d'introduire et d'explicitier le concept de la convertibilité d'un système d'assemblage automobile. Dans un premier temps, il semblait indispensable de décrire la ligne d'assemblage automobile et de fournir des descriptions détaillées sur la hiérarchisation du produit automobile et sa gestion au sein de la ligne d'assemblage.

Ensuite, une caractérisation de la convertibilité du système d'assemblage a été proposée en se basant d'une part sur la littérature scientifique, et d'autre part sur les données du terrain. En effet, il est nécessaire lors de la conception d'une famille de produits de prendre des décisions transversales visant à intégrer les aspects de conception du produit, du processus et des ressources. Ces trois paramètres sont étroitement liés et dans le cas des produits à forte diversité, un mauvais choix sur l'un de ses paramètres peut engendrer des surcoûts difficiles à corriger par la suite.

Cependant, l'évaluation de la convertibilité repose sur les interactions qui existent entre les trois éléments identifiés, à savoir la convertibilité Produits – Processus, la convertibilité Produits – Ressources et la convertibilité Processus – Ressources. L'expertise industrielle nous a permis d'identifier les paramètres clés qui influent sur les trois niveaux de convertibilité précités. Nous utiliserons ces paramètres pour construire des indicateurs permettant aux industriels d'évaluer la convertibilité globale de leur système d'assemblage et de prendre les bonnes décisions quant à l'introduction de nouvelles variantes du produit.

Nous avons ainsi considéré la séquence d'assemblage pour évaluer la convertibilité Produits – Processus, les interfaces de posage, de préhension et les interfaces – outils pour évaluer la convertibilité Produits – Ressources. La convertibilité Processus – Ressources est, quant à elle, évaluée par la capacité de la configuration existante à absorber la diversité introduite. Ces indicateurs seront également complétés par une étude de coût qui fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 4

Modèles mathématiques pour l'évaluation de la convertibilité d'un système assemblage automobile

L'objet de ce chapitre est la présentation de modèles mathématiques pour l'évaluation de la convertibilité du système d'assemblage automobile. Les indicateurs proposés couvrent l'aspect technologique physique, c.-à-d. les interactions qui incluent l'élément Ressources, à savoir la convertibilité Produits - Ressources et la convertibilité Processus - Ressources. Ainsi que l'aspect logique représenté par la convertibilité Produits - Processus. Le dernier paragraphe de ce chapitre fait l'objet d'une étude de coût pour compléter les indicateurs proposés.

Sommaire

4.1	Introduction	65
4.2	Convertibilité Processus – Ressources	65
4.2.1	Revue de la littérature scientifique	65
4.2.1.1	Définitions	65
4.2.1.2	Mesures de la convertibilité Processus - Ressources	67
4.2.1.3	Synthèse	69
4.2.2	Présentation de l'approche	71
4.2.2.1	Description de la démarche	71
4.2.2.2	Présentation de l'heuristique	72
4.2.3	Conclusion	74
4.3	Convertibilité Produits - Ressources	74
4.3.1	Revue de la littérature scientifique	74
4.3.1.1	Définitions	74
4.3.1.2	Mesures de la convertibilité Produits - Ressources	75
4.3.1.3	Synthèse	76
4.3.2	Présentation de l'approche	76
4.3.2.1	Description de la démarche	76
4.3.2.2	Formulation mathématique	80
4.3.3	Conclusions	83
4.4	Convertibilité Produits - Processus	83
4.4.1	Revue de la littérature scientifique	83
4.4.1.1	Définitions	83
4.4.1.2	Mesures de la convertibilité Produits - Processus	84
4.4.1.3	Synthèse	85
4.4.2	Présentation de l'approche	85
4.4.2.1	Description de la démarche	85
4.4.2.2	Formulation mathématique	87
4.4.3	Conclusion	89
4.5	Etude de coûts	89
4.5.1	Revue de la littérature scientifique	89
4.5.1.1	Définitions	89
4.5.1.2	Mesures du coût de la convertibilité	90
4.5.1.3	Synthèse	91
4.5.2	Présentation de l'approche	91
4.5.2.1	Présentation de la démarche	91
4.5.3	Formulation mathématique	93
4.5.4	Conclusion	93
4.6	Synthèse	93

4.1 Introduction

Dans la continuité du chapitre précédent, nous proposons d'introduire, dans ce chapitre, la seconde partie de notre contribution scientifique dans le domaine de la convertibilité des systèmes d'assemblage. Nous avons consolidé dans le chapitre précédent l'évaluation de la convertibilité des systèmes d'assemblage automobile caractérisés par trois éléments principaux qui sont les produits, les processus et les ressources. Un concept, baptisé AutoConvert, a été introduit et a permis d'établir les interactions existantes entre ces trois éléments en vue de dégager les paramètres clés qui ont une influence importante sur la convertibilité d'un système d'assemblage automobile. Il s'agit maintenant de construire des indicateurs quantitatifs pour évaluer la convertibilité de celui-ci.

En conséquence, ce chapitre est organisé en quatre parties. La première partie introduit l'indicateur de convertibilité Processus-Ressources (Lafou, et al., 2014) (Lafou, et al., 2015), qui se base sur les travaux réalisés dans (Spicer, et al., 2002) (Maier-Sperdelozzi, et al., 2003) (Koren, et al., 2010a) et propose une version adaptée aux spécificités des systèmes d'assemblage à modèles mélangés. La deuxième partie présente l'indicateur de convertibilité Produits- Ressources, qui met en avant l'importance des interfaces de posage, de préhension et des interfaces outils pour une meilleure gestion de la diversité des produits (Lafou, et al., 2014) (Lafou, et al., 2016a). La troisième partie, quant à elle, introduit l'indicateur de convertibilité Produits - Processus qui met en avant l'importance de la convertibilité des séquences dans la convertibilité globale du système (Lafou, et al., 2016b). La quatrième partie vient compléter l'aspect technologique, introduit par les indicateurs précités, en proposant de le consolider par un aspect économique qui couvre des paramètres supplémentaires liés à la spécificité de chaque usine et à sa localisation géographique.

4.2 Convertibilité Processus – Ressources

4.2.1 Revue de la littérature scientifique

4.2.1.1 Définitions

La configuration d'un système de production est déterminée par l'agencement de ses machines et les connexions entre elles par l'intermédiaire du système de manutention. Les configurations du système peuvent être classées principalement en deux types : des configurations synchrones et des configurations asynchrones (voir Chapitre 2). Pour un certain nombre de machines, si on inclut les configurations en série, parallèles et hybrides (voir figure 4.1), le nombre généré de configurations possibles devient très élevé. Par exemple, pour six machines, il peut y avoir 170 configurations différentes (Koren et al, 1998) (Koren, et al., 2010a).

Le choix de la configuration a un impact important, non seulement sur la capacité d'adaptation aux exigences du marché, mais aussi sur la fiabilité, la productivité, la qualité du produit, et le coût. Il est donc important de comprendre cet impact pour bien choisir la configuration en vue d'aboutir à des performances optimales.

Dans la littérature, de nombreux facteurs ont été identifiés pour sélectionner parmi toutes les possibilités générées, les meilleures configurations pour un système d'usinage. Dans (Koren, et al., 1998) et (Spicer, et al., 2002), deux facteurs de sélection sont introduits, à savoir :

(1) La longueur de la configuration, qui représente le nombre d'opérations ou de ma-

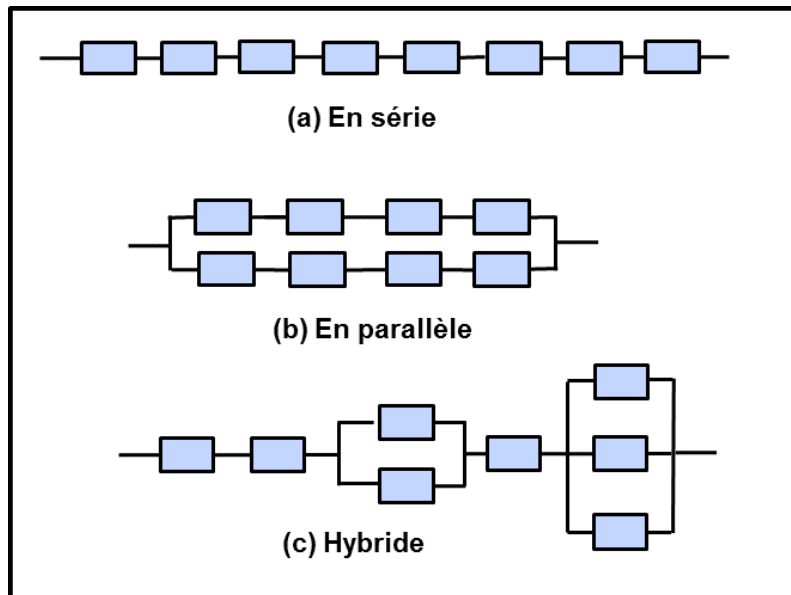


Figure 4.1 – Types de configurations

chines à travers lesquelles passe une pièce. Dans les configurations mono-processus, la longueur de la configuration est égale au nombre d'opérations par lesquelles doit passer un produit. Par exemple, la longueur de la configuration de la figure 4.1 (a) est de 8, 4.1 (b) est de 4, et 4.1 (c) est de 5. La longueur maximale de la configuration est obtenue lorsqu'une seule tâche d'usinage est affectée à chaque machine. Par exemple, une pièce complexe qui nécessite 50 opérations d'usinage peut avoir une configuration de longueur maximale de 50 machines. Alors que la longueur minimale d'une configuration est égale à un. Elle correspond au cas où toutes les tâches d'usinage peuvent être effectuées sur une même machine, pour les pièces simples par exemple.

(2) La largeur de la configuration qui peut être définie par le nombre de machines en parallèle dans une configuration donnée. Par exemple, sur la figure 4.1 (b), la largeur de configuration est égale à 2. Quand le nombre de machines en parallèle varie, comme représenté sur la Figure 4.1 (c), on peut parler de la largeur maximale, qui est égale à 3 dans cet exemple. La largeur de la configuration est une fonction de la capacité de production requise et la longueur de la configuration. Sa valeur maximale est obtenue quand la configuration est à sa longueur minimale. Ainsi, chaque opération a un temps de cycle long, et de nombreuses machines sont requises en parallèle pour satisfaire aux exigences de capacité. Alors que sa valeur minimale est atteinte lorsque la configuration du système est à sa longueur maximale. Dans ce cas, chaque opération a un temps de cycle court, et quelques machines en parallèle sont nécessaires pour répondre aux exigences de capacité.

(Maier-Sperdelozzi, et al., 2002) et (Maier-Sperdelozzi, et al., 2003), introduisent deux facteurs de sélection supplémentaires, à savoir :

(3) L'incrément minimal de conversion qui donne des informations sur la rapidité d'introduction d'un nouveau produit. Il représente le pourcentage du temps de conversion total qui doit être investi avant qu'un nouveau produit ne soit mis en place pour production. Ainsi, le

nombre d'incrément possibles de convertibilité pour chaque configuration est égal au nombre de trajectoires d'écoulement. Par exemple, la configuration (a) de la figure 4.1 a un incrément minimal de conversion de 100%. En effet, afin d'introduire un nouveau produit, l'ensemble de la ligne doit être arrêtée, reconfigurée et redémarrée. Par contre, la configuration 1 (b), peut être partiellement convertie en un nouveau produit après seulement que 50% des machines soient arrêtées et reconfigurées.

(4) Le nombre de connexions de routage qui donne des indications sur le débit et le degré de convertibilité de la configuration. Il correspond au nombre de connexions entre les machines ainsi que les connexions d'entrée et de sortie de la ligne. Par exemple, la configuration (a) sur la figure 4.1, possède neuf connexions de routage tandis que la configuration (b) dispose de dix connexions. Pour les configurations de n machines, le nombre maximal de connexions est donné dans l'équation suivante :

$$R_{max} = 2n + f \sum_{i=0}^{n-1} i \quad (4.1)$$

Si les connexions entre les machines permettent un flux unidirectionnel, $f = 1$. En cas de flux bidirectionnel, $f = 2$. Par exemple, pour une configuration unidirectionnelle de 3 machines, on obtient : $R_{max} = 9$

Un aspect supplémentaire a également été considéré par (Devisé, et al., 2000) (Avikal, et al., 2013). Il s'agit de l'implantation (layout) de la configuration du système de production. Il désigne la forme et la structure principale de l'atelier par rapport aux machines et le système de manutention. Plusieurs morphologies ont été proposées telles que (a) la ligne circulaire, (b) la ligne en forme de S, (c) La ligne en forme de U et (d) la ligne droite, comme le montre la figure 4.2.

Chaque implantation possède ses avantages et ses inconvénients. Plusieurs critères sont pris en compte afin de choisir l'implantation adéquate pour un système de production. Ces critères comprennent le nombre de machines, l'espace au sol disponible, la gestion du système de manutention et le nombre d'opérateurs. En effet, l'implantation d'une configuration peut rendre difficile l'augmentation du nombre de machines dans certains cas (Forme circulaire) ou au contraire, il peut rendre son extensibilité plus facile dans d'autres cas (la forme en S par exemple).

4.2.1.2 Mesures de la convertibilité Processus - Ressources

Le système de production se trouve aujourd'hui face à un environnement en constante fluctuation. En effet, les incertitudes augmentent devant des clients de plus en plus exigeants et des cycles de vies de produits de plus en plus courts. Il doit faire face aujourd'hui à des exigences auxquelles il n'a pas été initialement conçu. La sélection de la meilleure configuration d'un système de production peut se faire sur plusieurs critères (Adaptabilité à la demande du marché, la productivité, la fiabilité, le coût...). Cette caractéristique multicritère a poussé plusieurs chercheurs, (Abdul-Hamid, et al., 1999) (Park et al., 2005) (Abdi, 2005) (Chang, 2007) à utiliser le modèle de l'analyse multicritère AHP (Analytic Hierarchy Process) pour comparer plusieurs configurations. A chaque critère de la liste, un poids est attribué. La meilleure

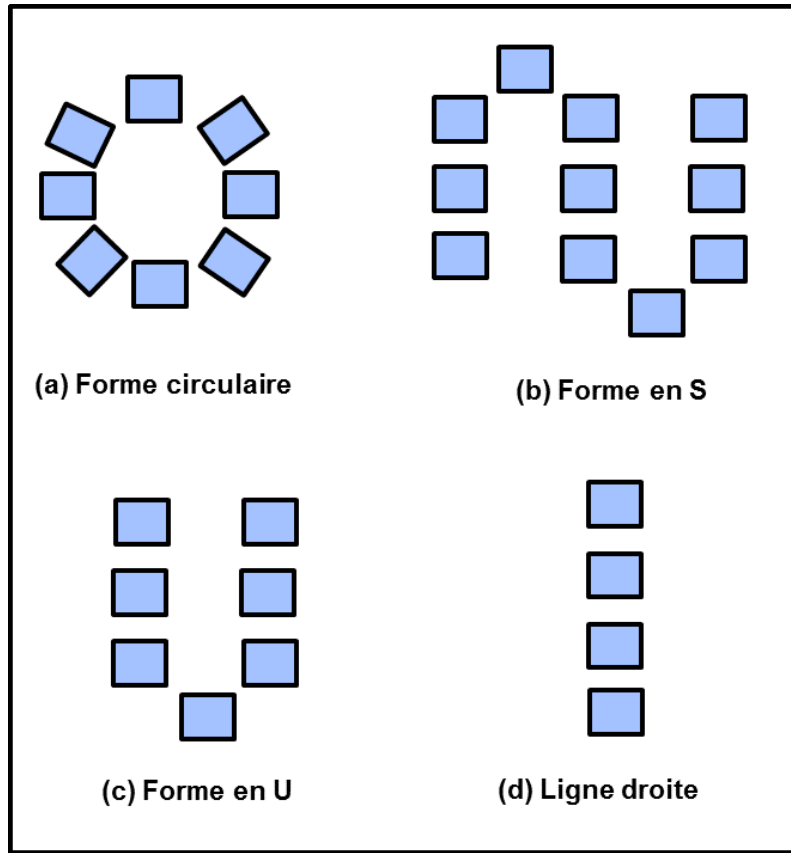


Figure 4.2 – Exemples d'implantations

alternative est celle qui collectera un maximum de points.

En se basant sur certains des facteurs décrits dans le paragraphe précédent, (Maier-Sperdelozzi, et al., 2003), quant à eux, présentent une approche quantitative pour évaluer la convertibilité de la configuration des systèmes de production ayant un processus unique avec des machines identiques à chaque étape :

$$C_c = \frac{R * X}{I} \quad (4.2)$$

C_c : Convertibilité de la configuration

R : Nombre de routages

I : incrément minimal de conversion

X : largeur de la configuration

L'équation (4.2), ci-dessus, est utilisée pour normaliser C_c par rapport à un système en série avec le même nombre de machines, et pour ajuster l'échelle de sorte que tous les systèmes comparés soient dans une plage de un à dix.

$$C_{c,Normalisé} = 1 + \frac{\log\left(\frac{C_c}{C_{c,série}}\right)}{\log\left(\frac{C_{c,K-parallèle}}{C_{c,K-série}}\right) \times \frac{1}{9}} \quad (4.3)$$

C_c : Convertibilité de la configuration

K : Nombre total des machines

$C_{c,K\text{-parallèle}}$: Convertibilité d'une configuration parallèle pure de K machines

$C_{c,K\text{-série}}$: Convertibilité d'une configuration série pure de K machines

Si K est le nombre maximal de machines du système considéré, la configuration parallèle pure de K machines est définie en vue d'avoir une valeur $C_c = 10$. Par conséquent toutes les configurations en série ont une valeur $C_c = 1$.

4.2.1.3 Synthèse

Dans la littérature, les chercheurs se sont inspirés des systèmes d'usinage pour ressortir les facteurs de sélection des configurations convertibles. Les critères proposés portent sur le nombre de machines et leur disposition. Cependant, en assemblage automobile, la configuration de la ligne est découpée en pas de travail ; dans un pas de travail, l'on peut disposer une ou plusieurs machines, un ou plusieurs opérateurs comme précédemment illustré dans le chapitre 3. La convertibilité de la configuration des lignes d'assemblage n'a pas connu le même intérêt que celui porté, dans la littérature, à l'étude de la convertibilité des systèmes d'usinage. Dans le cas de l'industrie automobile, cela pourrait être expliqué par deux raisons :

La première concerne le fait que la configuration de la ligne d'assemblage automobile est principalement en série. Toutefois, il peut y avoir des pas de travail, disposés physiquement en série, mais qui opèrent en alternance (Voir configuration (a) de la figure 4.3) ; ce qui pourrait avoir une incidence sur le temps de cycle, par exemple. En effet, une configuration, telle illustrée dans la configuration (b) de la figure 4.3, est quasiment inenvisageable à cause des investissements lourds engendrés par la modification du système de manutention.

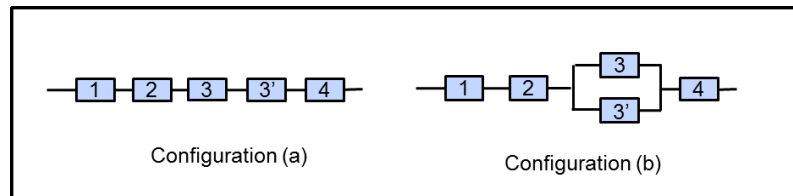


Figure 4.3 – Exemples de configurations

NB : Dans certaines usines automobiles, il peut y avoir des lignes d'assemblage en parallèle mais qui sont totalement indépendantes et ne permettent pas de cross-over, c. à d. qu'un véhicule ne peut pas passer d'une ligne à l'autre en cours de traitement.

La deuxième raison concerne le caractère manuel des opérations d'assemblage qui pourrait, à première vue, donner une impression de forte convertibilité et négliger l'impact de la configuration. Or, l'expérience industrielle a montré que la convertibilité de la configuration des lignes d'assemblage a un impact non négligeable dans la convertibilité globale du système. En effet, l'ajout de pas de travail est lourd en termes de temps et d'investissement.

En outre, la littérature ne considère que les configurations à processus unique. Cette hypothèse rend difficile l'adaptation des paramètres identifiés au système d'assemblage automobile, qui lui, fait partie des configurations à processus variables. Une configuration en série à processus unique ne peut traiter qu'un seul produit à la fois. Par conséquent, pour lancer la production d'un nouveau produit, la ligne entière doit être arrêtée, intervertie et redémarrée.

Dans le cas du processus unique, la production de deux ou plusieurs produits différents n'est possible que par l'introduction de lignes en parallèle.

Nous présentons, dans le tableau 4.1, les principaux facteurs utilisés dans la littérature pour évaluer la convertibilité de la configuration des systèmes d'usinage en les confrontant aux spécificités d'un système d'assemblage automobile :

Paramètres pour l'évaluation de la convertibilité de la configuration	Système d'usinage	Système d'assemblage automobile
	Une machine	Un pas de travail
	Largeur de la configuration : nombre de machines en parallèle.	La configuration est principalement en série, la largeur est donc égale à 1.
	Longueur de la configuration	Elle correspond dans le cas de l'assemblage automobile au nombre de pas de travail.
	Incrément de conversion	Méthode de calcul différente*
	Nombre de routages	Le flux est unidirectionnel dans la majorité des tronçons d'assemblage.

Tableau 4.1 – Adaptation des principaux facteurs pour l'évaluation de la convertibilité d'un système d'usinage à un système d'assemblage automobile.

* La méthode de calcul de l'incrément de conversion ne s'applique pas de la même manière aux lignes à configuration asynchrones. Nous rappelons que la configuration asynchrone est une configuration durant laquelle les composants peuvent subir des séquences d'opérations différentes dépendant de leurs trajectoires au sein du système (voir chapitre 2).

Si l'on examine la définition donnée par (Maier-Sperdelozzi, et al., 2003), l'incrément de conversion correspond au nombre de trajectoires d'écoulement possibles. Cette valeur peut être différente pour une même configuration en série avec le même nombre de pas de travail dans le cas des configurations à processus variables.

Par conséquent, cette hypothèse constitue une véritable limite quant à son applicabilité aux configurations à processus variables. En effet, les paramètres considérés (Incrément de conversion, largeur de la configuration) tels qu'ils sont définis ne trouvent plus leur sens dans les lignes d'assemblage automobile ; celles-ci étant à modèles mélangées et principalement configurées en série.

L'implantation est néanmoins un aspect important dans l'évaluation de la convertibilité de la configuration des systèmes d'assemblage automobile. En effet, le coût d'ajout de pas de travail dépendra, entre autres, de l'implantation de la ligne d'assemblage. Par exemple, le coût sera supérieur dans le cas d'une ligne circulaire par rapport à une ligne en U.

La figure 4.4 présente un exemple de tronçons d'assemblage automobile, d'une longueur de sept pas de travail, traitant trois variantes à la fois.

La variante (a) nécessite 5 pas de travail pour être traitée alors que la variante (b) a besoin de 4 pas de travail pour son traitement. Par conséquent, durant le passage de chaque variante, certains pas de travail restent inactifs (Pas de travail colorés en gris). Nous considérons que la convertibilité de la configuration est maximale lorsque le nombre de pas de travail inactifs est réduit à zéro.

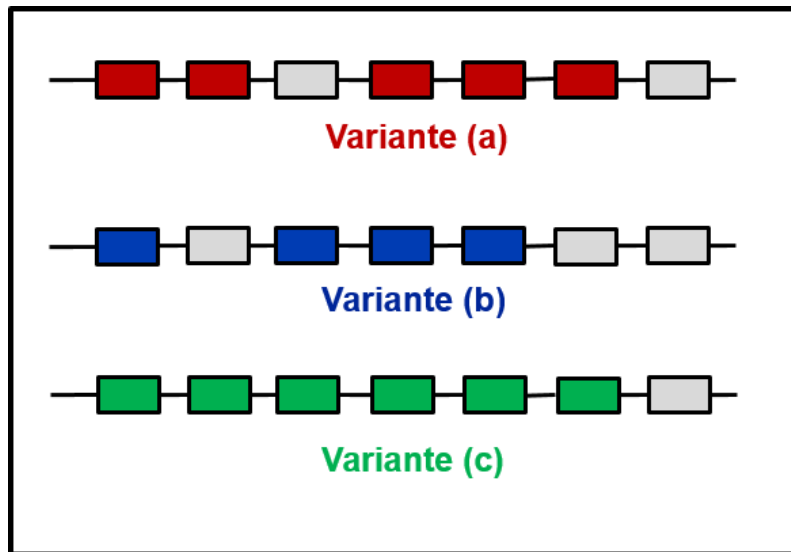


Figure 4.4 – Exemple d’une ligne d’assemblage traitant trois variantes différentes

Par conséquent, la construction de l’indicateur de convertibilité de la configuration d’une ligne d’assemblage automobile prendra en considération essentiellement la longueur de la ligne, comme représenté dans la figure 4.4. Le paramètre de la morphologie ne sera pas considéré dans son aspect technologique, car il sera pris en compte dans l’approche coût, que nous présentons en fin de ce chapitre.

4.2.2 Présentation de l’approche

4.2.2.1 Description de la démarche

En raison de la complexité des lignes d’assemblage à modèles mélangés (voir chapitre 2) et la spécificité de chaque situation, il est difficile de construire des modèles théoriques qui permettent l’évaluation de la convertibilité de tous les types de configurations. Basé sur des observations empiriques et sur les pratiques industrielles actuelles pour traiter la diversité des produits, un nombre d’inducteurs a été identifié pour être aussi proche que possible du contexte industriel réel.

Dans une ligne d’assemblage automobile, quand une nouvelle variante est introduite, deux cas principaux apparaissent :

- Le premier est quand la nouvelle variante peut être traitée en utilisant les mêmes pas de travail existants dans le même ordre. Dans ce cas, aucun pas de travail supplémentaire n’est nécessaire. Par conséquent, la convertibilité de la configuration atteint sa valeur maximale.
- Le deuxième cas est lorsque la nouvelle variante exige des pas de travail supplémentaires en raison de la spécificité d’une variante (par exemple, l’assemblage des moteurs électrique et thermique sur une même ligne exige des pas de travail spécifiques) ou en raison de la richesse importante d’une variante (le cas des véhicules suréquipés).

Dans ce deuxième cas, quand au moins un pas de travail supplémentaire est exigé, deux situations sont possibles :

- La ligne d'assemblage a des pas de travail disponibles et suffisants pour faire face aux fluctuations du marché. Dans cette situation, le paramètre qui évaluera la convertibilité de la configuration est l'emplacement des pas de travail à insérer ainsi que le nombre de pas qui devraient être déplacés pour être conforme au nouveau processus.
- La ligne d'assemblage n'a aucun (ou pas suffisamment de) pas de travail disponibles dans la configuration existante. On considère que cette situation est la moins convertible, car pour reconfigurer la ligne, le temps et l'investissement nécessaires sont très importants.

Ces constats seront utilisés dans le paragraphe suivant, pour construire une heuristique permettant l'évaluation de la convertibilité Processus – Ressources d'une ligne d'assemblage automobile.

4.2.2.2 Présentation de l'heuristique

- *Hypothèses* :

- La ligne d'assemblage considérée est configurée en série.
- Le même tronçon d'assemblage est considéré dans les usines à comparer.
- Les hypothèses générales présentées dans le chapitre 3 s'appliquent au modèle proposé.

Pour la construction de l'heuristique d'évaluation de la convertibilité de la configuration, nous devons disposer des données suivantes qui concernent :

- La configuration de la ligne d'assemblage avant l'introduction de la nouvelle variante :
 - Le nombre de pas de travail disponibles dans la ligne et leur emplacement.
- La configuration de la ligne d'assemblage après introduction de la nouvelle variante :
 - Le nombre de pas de travail supplémentaires requis en raison de la diversité produit introduite.
 - Le nombre de pas de travail à déplacer.

Pour les usines qui disposent de pas de travail disponibles, nous calculons la valeur de R , défini comme suit :

$$R = \frac{\text{Nombre de pas de travail nécessaires}}{\text{Nombre de pas de travail disponibles}} \quad (4.4)$$

Lorsque ($R > 1$) pour une configuration donnée, sa convertibilité est minimale en raison du temps et de l'investissement requis pour mettre en place les pas de travail supplémentaires nécessaires. Par conséquent, cette alternative devrait être considérée comme le dernier recours.

Quand ($R \leq 1$), plusieurs cas sont possibles. Pour comparer la convertibilité de la configuration de plusieurs usines, nous comparons leur capacité à absorber la diversité en calculant le nombre de pas de travail à déplacer pour traiter la nouvelle variante. Ce nombre est représenté par :

$$X = \text{Nombre de pas de travail à déplacer} \quad (4.5)$$

La figure 4.5 présente l'heuristique de l'évaluation de la convertibilité Processus – Ressources.

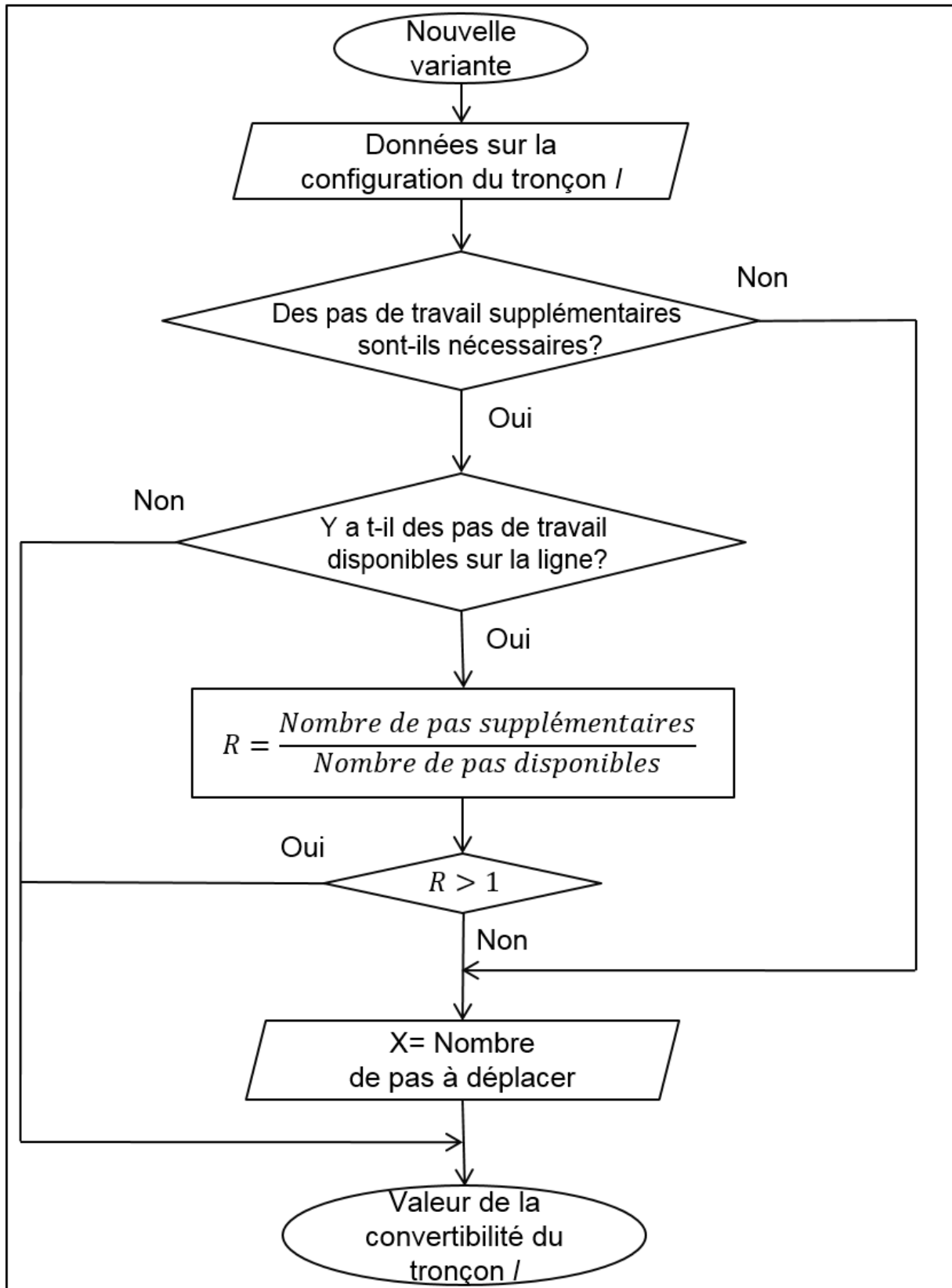


Figure 4.5 – Heuristique pour l'évaluation de la convertibilité Processus - Ressources du tronçon 1

Lorsqu'une nouvelle variante est candidate à être introduite dans plusieurs usines. L'application de cette heuristique permet de comparer les usines entre elles. En effet, nous mettons à l'épreuve la configuration de chaque usine avant et après introduction de la nouvelle variante. Par conséquent, nous considérons que les usines qui n'ont pas (ou pas assez) de pas disponibles pour introduire la nouvelle variante, comme ayant une convertibilité minimale. Alors que dans le cas où l'usine dispose des pas nécessaires à l'introduction de la nouvelle variante, comme ayant une convertibilité maximale. Enfin, les usines restantes seront comparées sur la base du nombre de pas de travail à déplacer.

4.2.3 Conclusion

La configuration d'une ligne d'assemblage automobile revêt un caractère important dans la capacité d'une usine donnée à introduire une nouvelle variante dans sa chaîne de production. Une modification du nombre de pas entraîne automatiquement des investissements lourds et par conséquent, un coût supplémentaire qui pourrait faire perdre à l'entreprise des parts de marché en faveur de ses concurrents.

Nous avons souligné dans cette partie les principaux facteurs qui impactent la convertibilité de la configuration, respectivement, l'ajout de pas de travail supplémentaire et le déplacement de pas de travail existants. Les travaux scientifiques qui ont proposé des mesures quantitatives ont eu recours à des hypothèses simplificatrices, et ne considèrent que les lignes de production à processus unique. Par conséquent, ils ne prennent pas en considération les spécificités des lignes d'assemblage à modèles mélanges, caractérisées par une complexité croissante suivant le nombre de variantes qu'elles traitent.

Compte tenu de ces données, nous avons opté pour une approche purement empirique, basée sur l'expertise industrielle et les pratiques utilisées actuellement en usine, pour construire un support d'aide à la décision sous forme d'une heuristique. En effet, l'indicateur proposé permet de comparer plusieurs usines quant à l'introduction d'une nouvelle variante et permet d'identifier l'usine ayant la configuration la plus convertible. Ce type d'indicateur n'existait pas jusqu'alors.

4.3 Convertibilité Produits - Ressources

4.3.1 Revue de la littérature scientifique

4.3.1.1 Définitions

Le type de flexibilité traité dans la littérature et qui se rapproche le plus de la convertibilité Produits – Ressources, telle que nous l'avons définie (Voir chapitre 3), est la flexibilité du produit. En effet, dans (Chryssolouris, et al., 2013), la flexibilité du produit est définie comme la capacité d'un système de production à produire une diversité de composants avec les mêmes équipements.

Dans (Lee, et al., 1997), une nouvelle approche, baptisée la Différenciation Retardée du Produit (DRP), a été introduite (Voir chapitre 2). Elle repose sur un concept visant l'augmentation de la diversité produit tout en maintenant une meilleure rentabilité du système industriel. Le principe est de retarder au maximum le point de différenciation (c. à d. l'étape durant laquelle le produit acquiert son identité unique). Plusieurs travaux ont été réalisés en vue de

trouver le point de différenciation optimal et discuter les limites de cette approche (He, et al., 1998) (Gupta et al., 20014) (Blecker, et al., 2005). En plus des aspects coût et temps sur lesquels reposent la DRP, (Rajan et al.2005) et (Koren, et al., 2010a) introduisent des approches qui se basent sur la commonalité de la famille de produits en vue d'évaluer sa flexibilité. Leurs approches revêtent un aspect technologique parce qu'elles mettent en avant l'impact des composants spécifiques dans le traitement d'une famille de produits.

4.3.1.2 Mesures de la convertibilité Produits - Ressources

Le présent paragraphe présente deux mesures de la convertibilité du produit, qui se basent, respectivement, sur les critères temps et coût. En effet, la méthode du ζ analogie introduite dans (Chryssolouris, 1996) (Bechrakis, et al., 1997) (Alexopoulos, et al., 2005), se sert de l'analogie avec un système mécanique pour comparer des systèmes de production différents quand ils sont exposés à une excitation similaire de leur environnement extérieur, elle est définie comme suit :

$$\zeta = \frac{1}{2Q} \quad (4.6)$$

Q : est l'amplitude du spectre de fréquence qui correspond à la fréquence naturelle fondamentale.

En se basant sur la méthode ζ analogie, (Alexopoulos, et al. 2007) introduisent l'indicateur FLEXIMAC, défini comme suit :

$$\text{FLEXIMAC} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \frac{1}{2Q_i} \quad (4.7)$$

Q_i : est l'amplitude du spectre de fréquence qui correspond à la fréquence naturelle fondamentale

Concrètement, les données nécessaires pour l'exécution de cet indicateur, dans un intervalle de temps donné, sont les suivantes :

$$\text{FLEXIMAC} = \frac{CPT}{CFT} \quad (4.8)$$

- **CPT : Le temps de transformation cumulé**, « *cumulative process time* ». Il correspond au temps nécessaire à une pièce pour qu'elle soit produite dans le système. Le temps de traitement représente le temps «pur» de traitement, n'incluant donc pas les retards résultant, par exemple, de l'attente de la disponibilité des ressources.
- **CFT : Le temps de flux cumulé**, « *cumulative flow time* ». Il correspond au temps d'écoulement réel de la pièce. Il peut être considéré comme étant la réponse du système à la demande. Dans les situations idéales, CFT est identique à CPT, ce qui correspond au cas où le système ne nécessite pas de temps d'installations, et que les pièces sont toujours disponibles et les ressources sont toujours prêtes à traiter les pièces.

La deuxième mesure qui repose dans sa construction sur le coût, est introduite par (Chryssolouris, et al., 1992), (Alexopoulos, et al., 2005). Elle est baptisée « *Penalty Of Change (POC)* » ; elle est définie comme étant la probabilité de changement potentiel multipliée par son coût. La valeur de POC est d'autant plus petite que la flexibilité est très grande. Son calcul nécessite

deux mesures :

- La probabilité d'un changement potentiel que ce soit au niveau du produit, du processus ou des ressources.
- La pénalité de ce changement.

$$POC = \sum_{i=1}^D Pn(X_i)Pr(X_i) \quad (4.9)$$

D : Nombre de changements potentiels

X_i : Le $i^{ème}$ changement potentiel

$Pn(X_i)$: Pénalité du $i^{ème}$ changement potentiel

$Pr(X_i)$: Probabilité que le $i^{ème}$ changement potentiel se produise

4.3.1.3 Synthèse

Les mesures de la convertibilité du produit introduites dans la littérature reposent principalement sur les aspects coûts et temps. Toutefois, l'aspect technologique physique n'a jamais été directement étudié et utilisé dans la construction de mesures permettant l'évaluation de la convertibilité. Certes, le coût représente un indicateur de convertibilité très fort, que nous introduirons à la fin de ce chapitre, mais il nous paraît indispensable de creuser un peu plus l'aspect technologique et de le faire apparaître de manière plus explicite dans la construction de l'indicateur de la convertibilité Produits – Ressources. En effet, dans notre approche nous examinons les interfaces entre le produit et les ressources durant tout le processus d'assemblage.

Un travail de recherche présenté dans (Lafou, et al., 2014) (Lafou, et al., 2015b), examine l'importance des interfaces de posage, de préhension et des interfaces outils dans l'évaluation de la convertibilité Produits – Ressources. Le produit est organisé en famille (voir chapitre 3) en vue de faciliter l'allocation de telle interface à telle famille de produits. Le paragraphe suivant présente plus en détail l'approche proposée.

4.3.2 Présentation de l'approche

4.3.2.1 Description de la démarche

L'approche proposée souligne l'importance des interfaces entre les produits et les ressources pour construire l'indicateur de la convertibilité Produits – Ressources. En effet, ce qui peut rendre une famille de produits moins convertible qu'une autre est initialement le nombre de composants spécifiques que ses variantes requièrent. Ces composants spécifiques, impactent considérablement la convertibilité, s'ils ont besoin d'interfaces outils spécifiques pour être traités et/ou d'interfaces de préhension et/ou de posage spécifiques pour être manutentionnés (Voir figures 4.6, 4.7 et 4.8).

En effet, des interfaces spécifiques peuvent exiger un coût et un temps supplémentaires pour la modification de la ligne de production. Toutes ces caractéristiques fournissent des informations sur les facteurs qui influencent la sensibilité du système face à l'introduction d'une

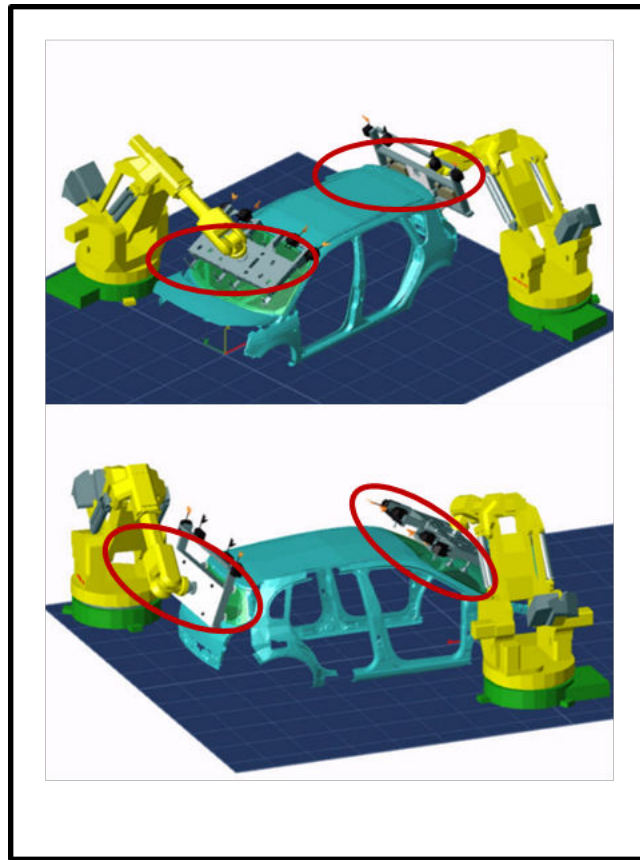


Figure 4.6 – Exemple d'interface de préhension

nouvelle variante. Par conséquent, ils permettent l'évaluation de la convertibilité Produits – Ressources. Une liste de composants majeurs est construite pour chaque tronçon d'assemblage. En effet, des milliers de composants sont assemblés dans la ligne d'assemblage et qui n'ont parfois aucun impact sur la convertibilité de la ligne. Par conséquent, nous proposons de réduire le nombre des composants à étudier en ne gardant que ceux qui sont en interface avec les ressources.

L'approche proposée est définie selon les étapes suivantes :

1. Classification des composants en familles (voir chapitre 3).
2. Identification des composants majeurs, incluant :
 - Les familles de composants qui ont des interfaces de posage.
 - Les familles de composants qui ont des interfaces de préhension.
 - Les familles de composants qui ont des interfaces outils.
3. Calcul de la synergie pour chaque type d'interface avant et après l'introduction de la nouvelle variante.

Nous définissons la synergie, S , entre les familles de composants existantes et les interfaces, comme suit :

$$S = \frac{\text{Nombre de composants avec des interfaces}}{\text{Nombre de types d'interfaces}} \quad (4.10)$$

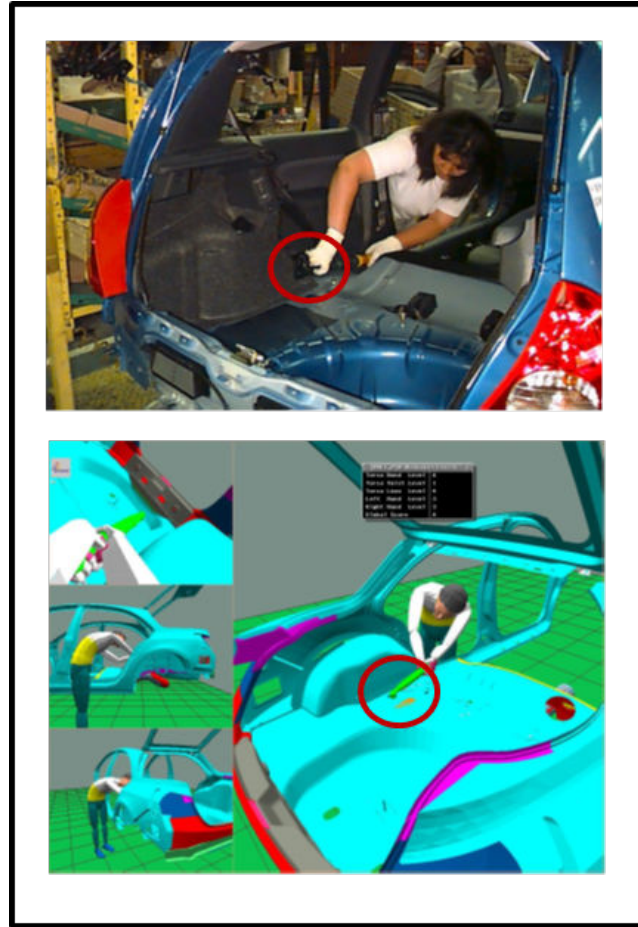


Figure 4.7 – Exemple d'interface outil

La mesure de la synergie atteint sa valeur maximale quand une seule interface est nécessaire par famille de composants. Tandis que sa valeur minimale correspond à 1 ; elle représente le cas où chaque composant nécessite une interface spécifique. Ceci est valable pour les trois types d'interfaces à savoir les interfaces de posage, de préhension et les interfaces outils. La valeur de la convertibilité Produits - Ressources est définie comme suit :

$$C_{Prod-Res} = \left(\frac{S_{après}}{S_{avant}} - 1 \right) * 100 \quad (4.11)$$

Avec :

$S_{après}$: La synergie entre les familles des composants et les interfaces après l'introduction de la nouvelle variante

S_{avant} : La synergie entre les familles des composants et les interfaces avant l'introduction de la nouvelle variante

La formule est construite de manière à ce que les valeurs obtenues soient comprises entre $]-100\%, +100\%]$. Les valeurs négatives résultent d'une dégradation de la synergie existante alors que les valeurs positives obtenues par l'indicateur informent sur l'amélioration de celle-ci. Nous présentons l'exemple suivant pour une meilleure compréhension de l'indicateur proposé. Nous considérons la famille de composants « caisse peinte » qui nécessite une interface de posage lors de son traitement (Voir figure 4.8).

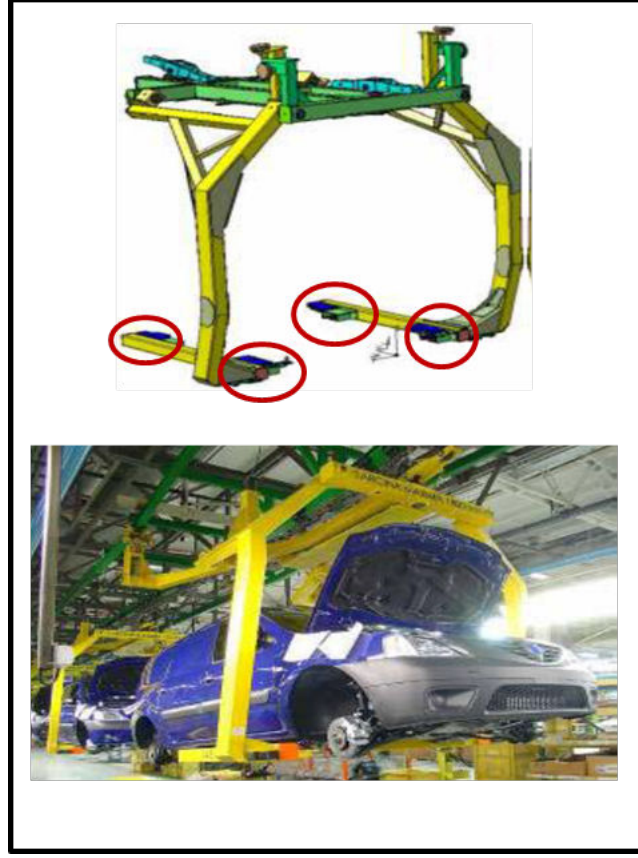


Figure 4.8 – Exemple d'interface de posage

On suppose que dans la ligne existante, on dispose de 5 types de caisses peintes et 3 types de balancelles. La valeur de la synergie avant introduction de la nouvelle variante est calculée comme suit :

$$S_{avant} = \frac{5}{3} \quad (4.12)$$

Si on introduit une nouvelle variante de caisse peinte. Deux situations sont possibles :

- La nouvelle caisse peinte peut être traitée par les balancelles existantes.

$$S_{après} = \frac{6}{3} \quad (4.13)$$

$$C_{Prod-Res} = \left(\frac{\frac{6}{3}}{\frac{5}{3}} - 1 \right) * 100 = +20\% \quad (4.14)$$

- La nouvelle caisse peinte nécessite une nouvelle balancelle

$$S_{après} = \frac{6}{4} \quad (4.15)$$

$$C_{Prod-Res} = \left(\frac{\frac{6}{4}}{\frac{5}{3}} - 1 \right) * 100 = -10\% \quad (4.16)$$

Par conséquent, quand une nouvelle variante est introduite, au moins un composant différent est introduit dans la ligne. Le but de cette modélisation est de calculer la synergie des

interfaces Produits – Ressources avant et après l'introduction de la nouvelle variante, pour évaluer la capacité des ressources à faire face à la diversité des produits. Dans l'exemple présenté, la valeur de $C_{Prod-Res}$ est négative lorsque la nouvelle caisse peinte nécessite une nouvelle interface. En effet, l'introduction d'une nouvelle interface a détérioré la synergie existante. Alors que sa valeur devient positive si elle est traitée par les interfaces existantes. La nouvelle caisse peinte a ainsi amélioré la synergie existante.

4.3.2.2 Formulation mathématique

- *Hypothèses* :

- La nouvelle variante introduit au minimum un composant de plus par rapport aux familles de composants existantes dans la ligne.
- Le nombre de composants total est supérieur ou égal au nombre d'interfaces.
- Les hypothèses générales présentées dans le chapitre 3 s'appliquent au modèle proposé.

Soit l un tronçon d'assemblage

Et x la nouvelle variante produit à introduire dans le tronçon l

La valeur de la convertibilité Produits - Ressources est alors formulée comme suit :

$$C_{Prod-Res,x,l} = \left[\frac{\left(\sum_{k=1}^l C'_{F_{sk}} + \sum_{j=1}^m C'_{F_{gj}} + \sum_{i=1}^n C'_{F_{ti}} \right)_{après}}{\left(\sum_{k=1}^l I'_{sF_k} + \sum_{j=1}^m I'_{gF_j} + \sum_{i=1}^n I'_{tF_i} \right)_{après}} - 1 \right] \times 100 \quad (4.17)$$

F_s : Famille de composants en interface de posage

F_g : Famille de composants en interface de préhension

F_t : Famille de composants en interface outil

C_{F_i} : Nombre de composants de F_i avant l'introduction de la nouvelle variante

C'_{F_i} : Nombre de composants de F_i après l'introduction de la nouvelle variante

l : Nombre de familles avec des interfaces de posage

m : Nombre de familles avec des interfaces de préhension

n : Nombre de familles avec des interfaces outils

I_{gF} : Nombre d'interfaces de préhension de F_i avant l'introduction de la nouvelle variante

I'_{gF} : Nombre d'interfaces de préhension de F_i après l'introduction de la nouvelle variante

I_{sF} : Nombre d'interfaces de posage de F_i avant l'introduction de la nouvelle variante

I'_{sF} : Nombre d'interfaces de posage de F_i après l'introduction de la nouvelle variante

I_{tF} : Nombre d'interfaces outils de F_i avant l'introduction de la nouvelle variante

I'_{tF} : Nombre d'interfaces outils de F_i après l'introduction de la nouvelle variante

$C_{Prod-Res,x,l}$: La convertibilité Produits – Ressources lorsque la variante x est introduite dans le tronçon l

- *Etude de sensibilité* :

Pour étudier la sensibilité de l'indicateur Produits – Ressources, nous allons, dans un premier temps, l'appliquer à une seule usine, a , avec :

$$S_{avant} = \frac{n}{m} \quad (4.18)$$

$$S_{après} = \frac{n'}{m'} \quad (4.19)$$

n : Le nombre de composants avant introduction de la nouvelle variante.

m : Le nombre d'interfaces allouées avant introduction de la nouvelle variante.

n' : Le nombre de composants après introduction de la nouvelle variante.

m' : Le nombre d'interfaces allouées après introduction de la nouvelle variante.

Pour une valeur de S_{avant} donnée, nous fixons la valeur de m' et nous faisons varier le n' . La courbe obtenue (voir figure 4.9) montre que quand on augmente la diversité des composants et que cela ne nécessite pas d'interfaces spécifiques supplémentaires, la convertibilité Produits – Ressources de la ligne, $C_{Prod-Res}$, augmente également.

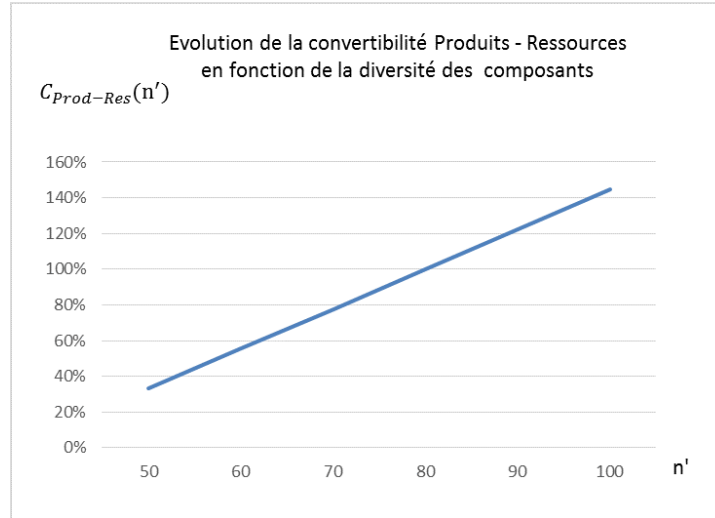


Figure 4.9 – Evolution de la convertibilité Produits - Ressources en fonction de la diversité des composants

Pour une valeur de S_{avant} donnée, nous fixons, cette fois-ci, la valeur de n' et nous faisons varier le m' . La courbe obtenue (voir figure 4.10) montre que quand le nombre d'interfaces spécifiques augmente, la convertibilité Produits – Ressources de la ligne diminue.

Dans un deuxième temps, nous allons considérer deux usines, a et b , dans lesquelles une variante v est introduite, avec :

$$S_{avant,a} = \frac{n}{m} \quad (4.20)$$

$$S_{avant,b} = \frac{z}{x} \quad (4.21)$$

n : Le nombre de composants avant introduction de la nouvelle variante dans l'usine a .

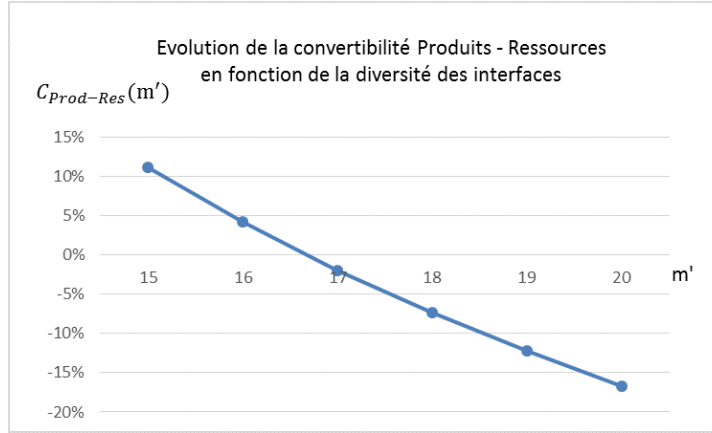


Figure 4.10 – Evolution de la convertibilité Produits - Ressources en fonction de la diversité des interfaces

m : Le nombre d'interfaces allouées avant introduction de la nouvelle variante dans l'usine a .

z : Le nombre de composants avant introduction de la nouvelle variante dans l'usine b .

x : Le nombre d'interfaces allouées avant introduction de la nouvelle variante dans l'usine b .

La synergie initiale de la ligne existante impacte le résultat de l'indicateur après introduction de la nouvelle variante. En effet, si l'on considère l'exemple suivant :

$$S_{avant,a} = \frac{45}{15} \quad (4.22)$$

$$S_{avant,b} = \frac{30}{5} \quad (4.23)$$

On suppose que la variante v a introduit 5 diversités composants dans les deux usines a et b sans nécessiter d'interfaces spécifiques dans les deux usines, nous obtenons les résultats suivants :

$$S_{après,a} = \frac{50}{15} \quad (4.24)$$

$$S_{après,b} = \frac{35}{5} \quad (4.25)$$

$$C_{Prod-Res,xa} = +11\% \quad (4.26)$$

$$C_{Prod-Res,xb} = +16\% \quad (4.27)$$

Si on examine la définition de l'indicateur de la convertibilité Produits – Ressources, celui – ci a pour objectif d'identifier l'usine qui est capable d'accueillir la nouvelle variante avec un minimum de modifications dans les interfaces existantes, que ce soient les interfaces de posage, de préhension ou les interfaces outils. Or, les deux usines considérées, a et b , ne nécessitent pas d'interfaces spécifiques mais c'est leur synergie initiale qui a conduit à avantager l'usine b (+16%) par rapport à l'usine a (+11%). D'où la nécessité de compléter l'indicateur technologique par un indicateur de coût.

Ainsi, l'indicateur technologique permet, d'une part, de déduire si l'introduction de la nouvelle variante améliore ou dégrade la synergie de l'usine existante et d'autre part, de fournir les éléments nécessaires pour la réalisation de l'étude de coût afin d'aboutir à la sélection finale de l'usine la plus convertible.

4.3.3 Conclusions

Une analyse fine des pratiques industrielles en usine a permis d'identifier les principaux leviers qui actionnent la convertibilité Produits – Ressources. En effet, les interfaces de posage, de préhension et les interfaces outils constituent la clé d'une meilleure gestion de la diversité des produits dans une ligne d'assemblage. Notre approche consiste à comparer la synergie du couple (Famille de composants, interfaces) avant et après l'introduction de la nouvelle variante. Ainsi, cela permettra d'identifier l'usine qui, par ses interfaces existantes, absorbera plus facilement la diversité des produits introduite.

4.4 Convertibilité Produits - Processus

4.4.1 Revue de la littérature scientifique

4.4.1.1 Définitions

Après avoir traité l'aspect technologique, nous passons à présent au traitement de la troisième interaction qui décrit l'aspect logique de la convertibilité. Dans une ligne d'assemblage à modèles mélangés, les industriels sont amenés à assembler plusieurs diversités de produits sur une même ligne. La divergence entre les séquences est parfois très importante ce qui nécessite d'importants coûts lors de l'introduction de nouvelles variantes. Par exemple, l'introduction d'un véhicule électrique dans une ligne d'assemblage de véhicules thermiques nécessite l'ajout de nouvelles opérations pour le traitement de certains composants spécifiques tels que la batterie et le moteur électrique. Par conséquent, la convertibilité des séquences constitue un élément clé dans la convertibilité globale du système d'assemblage.

Les termes utilisés dans la littérature et qui se rapprochent le plus de l'interaction Produits - Processus sont « **process planning** » et « **process flexibility** ». La flexibilité du processus, « **process flexibility** », traduit la diversité de pièces qu'un système de production peut produire sans modifications majeures (Sethi, et al., 1990). Le process planning, quant à lui, est défini par (ElMaraghy, et al., 2013), comme étant le lien entre la conception du produit et la manière de le produire. En effet, (Azab, et al., 2007) ont présenté une nouvelle méthode de reconfiguration du « **process planning** » d'un système d'usinage lors de l'introduction d'une nouvelle variante. Le concept utilisé dans leur méthode, baptisée « **Reconfigurable Process Planning (RPP)** », propose de réduire le problème de séquençement à un problème d'insertion. L'objectif est de déterminer le meilleur emplacement pour insérer la nouvelle opération dans la séquence existante tout en optimisant les critères objectifs et sans violer les contraintes spécifiées.

Une séquence d'assemblage représente l'**ensemble des opérations ordonnées nécessaires pour assembler un produit**. Une nouvelle séquence peut être obtenue soit par un échange, ou une substitution, de certaines opérations par d'autres. Nous définissons, la convertibilité des séquences, par la capacité du système d'assemblage à gérer la diversité des séquences pour faire face à la diversité des produits. Nous présentons dans le paragraphe suivant les principales mesures de la convertibilité Produits - Processus apparues dans la littérature.

4.4.1.2 Mesures de la convertibilité Produits - Processus

Dans (Warnecke, et al., 1982) (Son, et al., 1987) (Sethi, et al., 1990) , un ensemble de mesures a été présenté, dont les principales sont :

- Le volume de l'ensemble des types de pièces que le système peut produire.
- Le coût de commutation entre les tâches de production connues dans le programme de production existant.
- Le rapport entre le rendement total et le coût d'attente des pièces traitées pendant une période donnée.

Dans une même perspective, certains chercheurs ont utilisé les coefficients de similarité afin d'évaluer la similarité des opérations. Le coefficient de similarité le plus connu dans la littérature, concernant la similarité des opérations, est le coefficient de similarité de Jaccard introduit par (McAuley, 1972) :

$$JSC_{xy} = \frac{a}{a + b + c} \quad (4.28)$$

Avec $0 \leq JSC_{xy} \leq 1$

Où :

JSC_{xy} est le coefficient de similarité de Jaccard entre les variantes x et y

a est le nombre d'opérations communes entre les variantes x et y

b est le nombre d'opérations dans la variante x mais pas dans la variante y

c est le nombre d'opérations dans la variante y mais pas dans la variante x

Une extension du coefficient de similarité est introduite dans (Yin, 2006), elle concerne la pondération du coefficient dans le cas de données binaires. Récemment, la pondération du coefficient de similarité de Jaccard est introduite par (Navaei, et al., 2016). Il s'agit d'allouer un poids selon l'importance de chaque opération individuelle. Dans ce cas, l'équation (4.28) est modifiée comme suit :

$$JSC'_{xy} = \frac{\sum_{k=1}^T W_k I_{xk} I_{yk}}{\sum_{k=1}^T W_k J_{xyk}} \quad (4.29)$$

$$I_{xk} = \begin{cases} 1 & \text{si la variante } x \text{ nécessite l'opération } k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$J_{xyk} = \begin{cases} 1 & \text{si au moins une des deux variantes } x \text{ ou } y \text{ nécessite l'opération } k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

T est le nombre total des opérations des variantes et W_k est le poids de l'opération k .

4.4.1.3 Synthèse

En se basant d'une part sur la littérature et d'autre part sur les pratiques industrielles dans les usines d'assemblage automobile, nous définissons la convertibilité Produits - Processus comme étant la capacité du système à faire face à la diversité de produits nécessitant des séquences différentes dans une même ligne d'assemblage. Nous proposons dans le paragraphe suivant d'introduire un nouvel indicateur pour évaluer ce type de convertibilité en se basant d'une part sur le caractère spécifique des opérations, mis en avant dans le modèle de Jaccard, et d'autre part, en intégrant une liste de contraintes identifiées à partir du contexte réel auquel font face les industriels dans les lignes d'assemblage.

4.4.2 Présentation de l'approche

4.4.2.1 Description de la démarche

En industrie automobile, les concepteurs de la ligne se base sur un graphe d'assemblage de référence (Voir chapitre 3) lors de la conception des usines, ce graphe est équivalent au plan directeur d'usinage de la pièce type évoqué dans (Azab, et al., 2007). Les concepteurs du produit doivent également en tenir compte dans la conception des nouvelles variantes. Or, le graphe d'assemblage évolue dans le temps avec l'apparition de nouvelles technologies, réglementations, etc. Par conséquent, plusieurs usines ne sont pas conformes au graphe d'assemblage de référence actuel.

En outre, en raison de la mutualisation des moyens entre les constructeurs automobiles, il devient également de plus en plus difficile pour un constructeur de respecter le graphe d'assemblage de référence pour les nouvelles variantes ; chaque industriel défend son propre graphe d'assemblage. En effet, la convergence vers un même graphe d'assemblage nécessite une période de transition et n'est pas facile à mettre en place.

Évaluer la convertibilité Produits – Processus revient donc à confronter le graphe d'assemblage de la nouvelle variante à celui de la ligne d'assemblage existante ; c. à d. dans une même logique que celle suivie pour les deux premiers indicateurs, de comparer le graphe d'assemblage de la ligne existante avant et après l'introduction de la nouvelle variante. Le tableau 4.2 résume les différents scénarii possibles :

Graphe d'assemblage de la nouvelle variante	Graphe d'assemblage de référence	Graphe d'assemblage de la ligne existante
Cas 1	Conforme	Conforme
Cas 2	Non conforme	Conforme
Cas 3	Conforme	Non conforme
Cas 4	Non conforme	Non conforme

Tableau 4.2 – Les scénarii possibles quand une nouvelle variante est introduite

Dans le cas 1, la convertibilité de la séquence est maximale parce qu'aucune modification de la ligne n'est requise. Dans le second cas, la nouvelle variante pourrait être facilement introduite dans la ligne existante. Toutefois, cela dépend de la stratégie de l'entreprise, si elle

donne la priorité à la conformité avec le graphe d'assemblage de référence ou au lancement rapide sur le marché de la nouvelle variante. Par conséquent, nous sommes concernés par les deux derniers cas, dans lesquels la production de nouvelles variantes ne peut pas être lancée sans modifications dans la séquence de la ligne d'assemblage existante.

En se basant sur les pratiques industrielles dans une chaîne d'assemblage automobile, un certain nombre de contraintes supplémentaires sont identifiées afin de compléter **les contraintes de précédence**. Il convient de noter que cette liste est non exhaustive. Les contraintes identifiées sont :

- Les contraintes ergonomiques,
- Les contraintes de la disponibilité des composants,
- Les contraintes de la disponibilité d'outils,
- Les contraintes de la disponibilité de manutention.

Nous présentons l'exemple suivant afin d'illustrer chaque contrainte. L'assemblage de la roue de secours est l'opération considérée. En effet, la plupart des véhicules sont concernés par cette opération. Cependant, la roue de secours est un composant qui peut exister sous plusieurs diversités, formant ainsi la famille du composant roue de secours. Par conséquent, la roue de secours peut être considérée comme un composant spécifique par rapport à l'introduction d'un nouveau véhicule, ou bien comme une opération spécifique si l'on considère son opération d'assemblage.

Selon le nouveau véhicule, la roue de secours peut être assemblée en sous caisse ou dans le coffre du véhicule. Dans ce cas une contrainte ergonomique apparaît, en raison de la position de la caisse peinte lors de l'opération d'assemblage. En effet, un assemblage sous caisse nécessite que la caisse peinte soit portée par des balancelles alors que l'assemblage de la roue de secours dans le coffre nécessite que le véhicule soit mis dans une luge ou sur roues pour une meilleure accessibilité au coffre (voir figure 4.11).

En outre, la contrainte de la disponibilité du composant pourrait également poser problème. En effet, la roue de secours est un composant volumineux et sa livraison en bord de chaîne pourrait nécessiter un aménagement logistique conséquent. Si la variante du véhicule nécessite une roue de secours spécifique, une contrainte de la disponibilité de l'outil peut concerner la nécessité d'un outil spécifique pour faire face à de différentes spécifications de serrage. Enfin, une contrainte de disponibilité de manutention correspond, par exemple, à la nécessité de la présence d'une assistance de montage spécifique pour mettre en place la roue.

Dans ce contexte, lors de l'introduction d'une nouvelle variante du produit, la première vérification qui est systématiquement effectué est le nombre de composant commun entre la ligne existante et la nouvelle variante du produit. Si les composants de la nouvelle variante sont tous identiques à ceux de la ligne existante, sa séquence d'assemblage est facilement absorbée par la séquence d'assemblage existante. Sinon, si la nouvelle variante comporte des composants spécifiques, la convertibilité de la séquence est évaluée dans ce cas en se basant sur la vérification des contraintes identifiées.

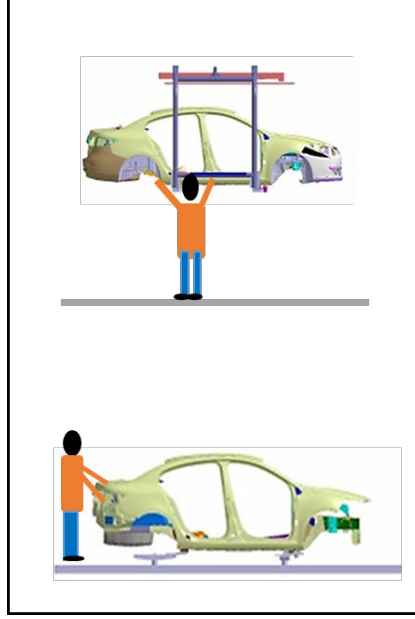


Figure 4.11 – Illustration d'une contrainte ergonomique

4.4.2.2 Formulation mathématique

- *Hypothèses* :

- Le même nombre de contraintes est considéré pour comparer les variantes.
- Les hypothèses générales présentées dans le chapitre 3 s'appliquent au modèle proposé.

Soit l un tronçon de la ligne d'assemblage.

R représente l'ensemble des composants de la variante x (voir figure 4.12)

z le nombre de composants de la variante x

t le nombre de composants spécifiques

S représente l'ensemble des composants assemblés dans le tronçon l de la ligne existante

n_i le nombre de contraintes vérifiées pour un composant i et m_i le nombre total des contraintes considérées

$C_{Prod-Proc,xl}$ la convertibilité Produits – Processus lorsque la variante x est introduite dans le tronçon l

L'indicateur de la convertibilité Produits – Processus est défini sous la forme suivante :

$$C_{Prod-Proc,xl} = \left(\frac{\sum_{i=1}^t n_i}{\sum_{i=1}^t m_i} \right) \times 100 \quad (4.32)$$

Les contraintes considérées sont :

- Les contraintes de précédence,
- Les contraintes ergonomiques,
- Les contraintes de la disponibilité des composants,

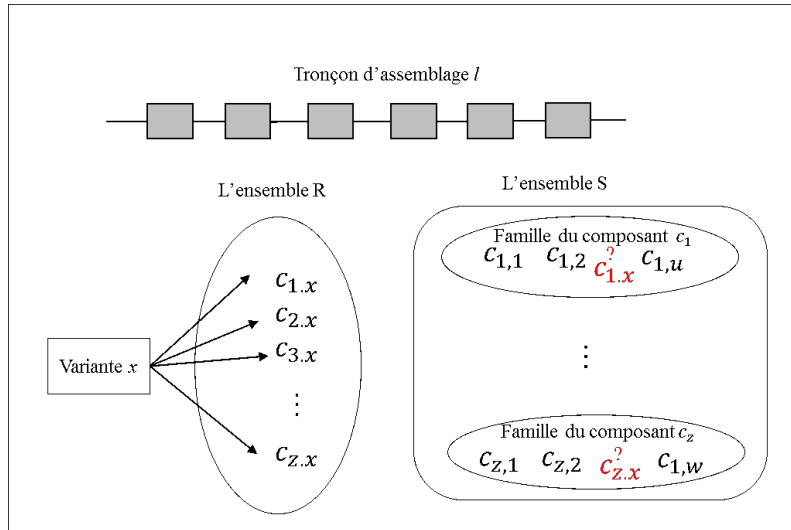


Figure 4.12 – Illustration des données de la convertibilité Produits - Processus

- Les contraintes de la disponibilité d'outils,
- Les contraintes de la disponibilité de manutention.

- *Etude de sensibilité :*

Pour étudier la sensibilité de l'indicateur Produits – Processus, nous allons, dans un premier temps, l'appliquer à une seule usine, a , avec :

$$C_{Prod-Proc,xa} = \left(\frac{\sum_{i=1}^t n_i}{\sum_{i=1}^t m_i} \right) \times 100 \quad (4.33)$$

L'indicateur $C_{Prod-Proc,xa}$ est proportionnel au nombre de contraintes vérifiées, n_i , comme illustré dans la courbe de la figure 4.13 :

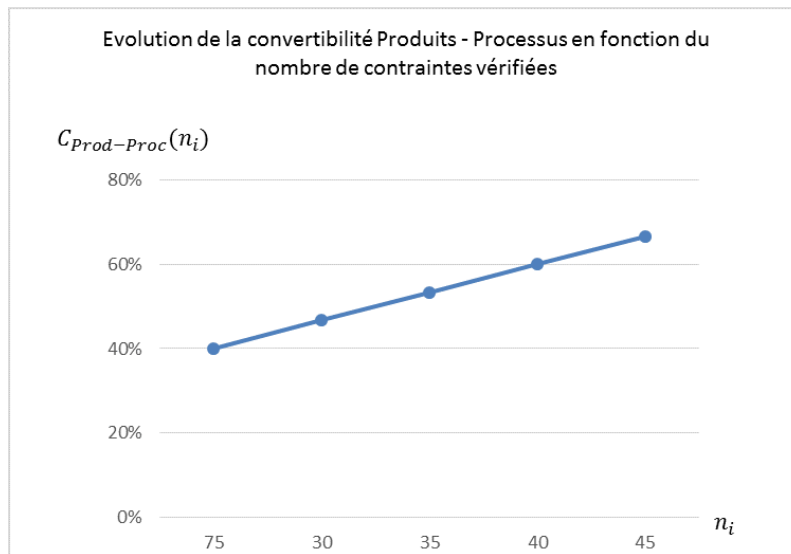


Figure 4.13 – Evolution de la convertibilité Produits - Processus en fonction du nombre de contraintes vérifiées

Ensuite, nous considérons deux usines a et b , dans lesquelles une nouvelle variante v , va être introduite, avec :

$$C_{Prod-Proc,xa} = \left(\frac{\sum_{i=1}^t n_i}{\sum_{i=1}^t m_i} \right) \times 100 \quad (4.34)$$

$$C_{Prod-Proc,xb} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{t'} n'_i}{\sum_{i=1}^{t'} m_i} \right) \times 100 \quad (4.35)$$

Où :

t est le nombre de composants spécifiques de l'usine a

t' est le nombre de composants spécifiques de l'usine b

Pour comparer la convertibilité Produits – Processus des deux usines a et b , nous devons disposer de la même base de comparaison, c. à d. que les composants considérés doivent être les mêmes dans les deux usines à comparer. Par conséquent, la base de comparaison doit être constituée des composants qui incluent :

e , le nombre de composants spécifiques à la fois dans l'usine a et dans l'usine b .

f , le nombre de composants spécifiques dans l'usine a et qui ne le sont pas dans l'usine b .

g , le nombre de composants spécifiques de l'usine b et qui ne le sont pas dans l'usine a .

Ainsi, les formules considérées doivent être sous la forme suivante :

$$C_{Prod-Proc,xa} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{e+f+g} n_i}{\sum_{i=1}^{e+f+g} m_i} \right) \times 100 \quad (4.36)$$

$$C_{Prod-Proc,xb} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{e+f+g} n'_i}{\sum_{i=1}^{e+f+g} m_i} \right) \times 100 \quad (4.37)$$

4.4.3 Conclusion

L'indicateur de convertibilité Produits - Processus vient compléter l'aspect technologique, couvert par les deux premiers indicateurs, en intégrant l'aspect logique qui caractérise les séquences d'assemblage. En effet, l'indicateur repose dans sa construction sur le respect d'un nombre de contraintes appuyées par les pratiques industrielles en usine. L'objectif de l'indicateur est d'identifier l'usine qui absorbera le plus facilement la séquence de la nouvelle variante en évaluant l'impact de chaque composant spécifique introduit.

4.5 Etude de coûts

4.5.1 Revue de la littérature scientifique

4.5.1.1 Définitions

Pour compléter les facteurs technologiques, une autre mesure de flexibilité qui est très souvent considérée est le coût. En effet, une entreprise doit trouver un compromis entre le degré de la variabilité (Voir chapitre 2) nécessaire et le coût qui lui est attribué, comme le montre la figure 4.14.

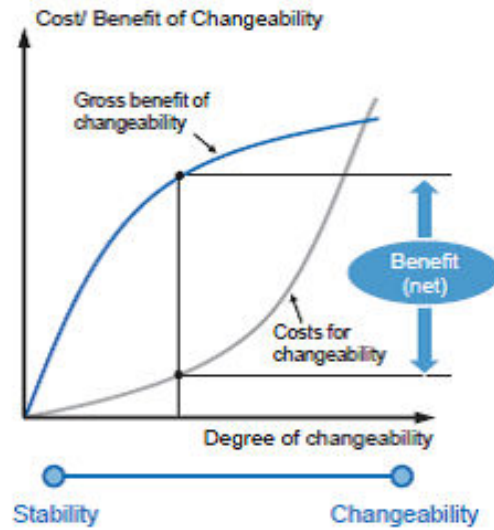


Figure 4.14 – Fonction coût-bénéfice de la variabilité (Schuh, et al., 2012)

L'objectif ne devrait donc pas être de fournir une convertibilité maximale, mais plutôt l'identification et la mise en œuvre d'un degré de convertibilité optimal spécifique à chaque entreprise.

Cependant, la mise en place de la convertibilité exige l'engagement de certains frais supplémentaires dès le départ, lorsque le système d'assemblage initial est conçu. Cet investissement permet à l'entreprise d'élargir l'échelle de production et/ ou d'introduire une nouvelle variante très rapidement, si les conditions du marché sont plus favorables que prévu.

La plupart des modèles de convertibilité proposés dans la littérature se basent dans leur construction sur des études de coûts (Urbani et al. 2006). En effet, à chaque perturbation du système de production, un coût est associé en vue d'en évaluer l'impact. Les principaux coûts considérés sont le coût d'installation, le coût d'opportunité, le coût de traitement, le coût de main d'œuvre, le coût de détention des stocks et le coût des ressources (machines, outils ...). Dans le paragraphe suivant, nous présentons les principales mesures de convertibilité qui se basent sur le coût.

4.5.1.2 Mesures du coût de la convertibilité

La mesure qui est largement utilisée dans la littérature pour évaluer le coût de la convertibilité des systèmes de production, est l'approche « Penalty Of Change » (POC) (Chryssolouris, et al., 1992 ; Chryssolouris, et al., 2013) présentée dans le paragraphe 3.1.2, que nous rappelons ci-après :

$$POC = \sum_{i=1}^D Pn(X_i)Pr(X_i) \quad (4.38)$$

D : Nombre de changements potentiels

X_i : Le $i^{ème}$ changement potentiel

$Pn(X_i)$: Pénalité du $i^{ème}$ changement potentiel

$Pr(X_i)$: Probabilité que le $i^{ème}$ changement potentiel se produise

Bien qu'elle ait été utilisée initialement pour l'évaluation de la convertibilité du produit, elle pourrait éventuellement s'étendre à tous les changements potentiels que ce soit au niveau du produit, du processus ou des ressources.

4.5.1.3 Synthèse

Le concept de **performance** intègre d'abord la notion d'**efficacité**, c'est-à-dire l'idée d'entreprendre et de mener une action à son terme. Dans notre cas, l'objectif est de pouvoir introduire la nouvelle variante et lancer la production de celle-ci. Ensuite vient la notion d'**efficience** qui vise à obtenir les résultats attendus au moindre coût. D'où la nécessité de mener une étude économique qui va permettre de trancher quant au choix de l'usine qui doit accueillir la nouvelle variante. En effet, le coût d'introduction d'une nouvelle variante diffère d'une usine à l'autre, selon les coûts de reconfiguration nécessaires, qui eux-mêmes, dépendent, entre autres, de l'emplacement géographique de l'usine. Les mesures de coûts proposées dans la littérature pour l'évaluation de la convertibilité, introduisent la notion de probabilité dans le calcul. En effet, cette approche permet de traiter l'aspect potentiel de la convertibilité. Or, notre problématique est traitée dans un environnement déterministe, donc il est possible d'évaluer l'impact de l'introduction d'une nouvelle variante en chiffrant directement son coût d'introduction en se basant sur les trois indicateurs de convertibilité introduit dans ce chapitre.

4.5.2 Présentation de l'approche

4.5.2.1 Présentation de la démarche

Pour compléter l'étude technologique de la convertibilité d'un système d'assemblage automobile, nous proposons de consolider les indicateurs de convertibilité introduits précédemment, par un chiffrage économique pour aboutir à un résultat robuste alliant efficacité et efficience. Pour évaluer le coût de la convertibilité, nous associons à chaque type de convertibilité un coût. Le coût associé est formulé en se basant sur les paramètres clés de chaque indicateur. Par conséquent, l'indicateur global de convertibilité du système d'assemblage automobile sera égal à la somme des coûts associés aux trois types de convertibilité précités.

a) Coût de la convertibilité Processus - Ressources

Le coût de la convertibilité Processus - Ressources repose sur un aspect technologique physique. Il s'agit en effet, du coût d'investissement à effectuer pour permettre à la configuration de la ligne existante d'absorber la diversité des variantes. Dans une ligne d'assemblage automobile, cela correspond à l'investissement nécessaire pour ajouter des pas de travail supplémentaires, ou bien au coût de déplacement de certains pas de travail en vue de préparer la ligne à introduire la nouvelle variante. Il est évalué sur la base des investissements engagés

dans les travaux de génie civil (Ajout de pas de travail) tout en intégrant le manque à gagner pour l'usine dans le cas où les travaux nécessitent l'arrêt de production en dehors des périodes d'arrêts programmés. Le coût de la convertibilité Processus – Ressources lors de l'introduction de la variante x dans le tronçon l , $\hat{C}_{Proc-Res,xl}$, est ainsi exprimé comme suit :

$$\begin{aligned} \hat{C}_{Proc-Res,vu} = & \text{Investissement initial} \\ & + \text{Nombre de jours d'arrêt de fermeture} \times \text{Manque à gagner journalier} \end{aligned} \quad (4.39)$$

b) Coût de la convertibilité Produits - Ressources

Le coût de la convertibilité Produits – Ressources correspond, quant à lui, au coût d'investissement dans les nouvelles interfaces et leur installation dans la ligne d'assemblage. Cependant, selon le type d'interface considérée, le coût peut être unitaire ou bien multiplié par le nombre total d'interfaces en question, ce dernier dépendant de la cadence. Par exemple, adapter l'interface balancelle nécessite d'adapter l'ensemble des balancelles en place sur la ligne, car elles ne sont pas triées lors du processus d'assemblage. Cet exemple constitue une limite de l'indicateur technologique qui ne fait pas apparaître cet aspect dans les résultats obtenus. D'où l'utilité de compléter l'étude par une étude économique. Le coût de la convertibilité Produits – Ressources lors de l'introduction de la variante x dans le tronçon l , $\hat{C}_{Prod-Res,xl}$, est ainsi exprimé comme suit :

$$\begin{aligned} \hat{C}_{Prod-Res,xl} = & \text{Investissement initial} \\ & + \sum_{i=1}^n (\text{Prix par interface} \times \text{Nombre d'interfaces}) \\ & + \text{Nombre de jours d'arrêt de fermeture} * \text{Manque à gagner journalier} \end{aligned} \quad (4.40)$$

Avec n le nombre de types d'interfaces à introduire.

c) Coût de la convertibilité Produits - Processus

L'indicateur de la convertibilité Produits – Processus repose dans sa construction sur la vérification d'un nombre de contraintes, l'objectif étant d'absorber la nouvelle séquence avec le minimum de modifications dans les séquences existantes. L'indicateur permet, en effet, de vérifier la facilité d'insertion des opérations spécifiques dans la séquence de la ligne d'assemblage existante. Le coût de ce type de convertibilité peut être évalué en calculant l'écart du coût d'exploitation entre la nouvelle variante et celui des variantes existantes. Le coût de la convertibilité Produits – Processus lors de l'introduction de la variante x dans le tronçon l , $\hat{C}_{Prod-Proc,xl}$, est ainsi exprimé comme suit :

$$\hat{C}_{Prod-Proc,xl} = \text{Ecart du coût d'exploitation entre la nouvelle variante et les variants existantes} \quad (4.41)$$

4.5.3 Formulation mathématique

La formule du coût de la convertibilité comporte ainsi une première partie liée à l'investissement initial en termes de ressources (Pas de travail, interfaces) et une deuxième partie correspondant à l'écart d'exploitation que l'introduction de la nouvelle variante a créée dans la ligne existante.

$$I_{c,xl} = \hat{C}_{Proc-Res,xl} + \hat{C}_{Prod-Res,xl} + \hat{C}_{Prod-Proc,xl} \quad (4.42)$$

$I_{c,xl}$: Indicateur du coût de la convertibilité du tronçon l lors de l'introduction de la variante x

$\hat{C}_{Proc-Res,xl}$: Coût de la convertibilité Processus – Ressources lors de l'introduction de la variante x dans le tronçon l

$\hat{C}_{Prod-Res,xl}$: Coût de la convertibilité Produits – Ressources lors de l'introduction de la variante x dans le tronçon l

$\hat{C}_{Prod-Proc,xl}$: Coût de la convertibilité Produits – Processus lors de l'introduction de la variante x dans le tronçon l

4.5.4 Conclusion

Nous avons présenté dans cette partie du chapitre l'étude économique qui devrait être menée en parallèle avec l'étude technologique (la convertibilité Processus – Ressources et la convertibilité Produits – Ressources) et l'étude logique (la convertibilité Produits – Processus) pour l'évaluation de la convertibilité globale d'un tronçon d'assemblage lors de l'introduction d'une nouvelle variante. En effet, cet indicateur vient compléter les paramètres clés sur lesquels s'est basé l'ensemble de notre étude de convertibilité, à savoir la configuration de la ligne d'assemblage, les interfaces produits - ressources et les séquences. L'aspect coût permet de corriger certaines limites des indicateurs de convertibilité proposés, qui concernent, par exemple, l'évaluation du coût de la mise en place d'une interface donnée, ou bien le coût de la main d'œuvre qui diffère d'une usine à l'autre selon sa localisation géographique. Par conséquent l'indicateur global est composé de deux parties. La première concerne l'investissement initial nécessaire au lancement de la nouvelle variante et la deuxième partie, traduit l'écart d'exploitation entre la nouvelle variante et les variantes existantes dans la ligne d'assemblage.

4.6 Synthèse

En raison de la complexité des lignes d'assemblage à modèles mélangés et de la spécificité de chaque situation, il est difficile de construire des modèles théoriques qui permettent l'évaluation de la convertibilité de tout type de système de production. Un bilan bibliographique sur les principales approches pour traiter la convertibilité des systèmes de production a été présenté. En se basant sur les résultats de l'étude bibliographique et sur les pratiques industrielles

actuelles pour traiter la diversité des produits, un nombre d'inducteurs a été identifié pour être aussi proche que possible du contexte industriel réel.

En intégrant des informations sur les produits, les processus et les ressources, les mesures de convertibilité proposées, dans le présent chapitre, permettent une évaluation quantitative de la convertibilité du système d'assemblage automobile. Une étude économique a été également menée pour compléter les indicateurs de convertibilité proposés et corriger leurs limites. En effet, ces indicateurs sont utiles pour comparer la convertibilité des ateliers d'assemblage et pour argumenter la décision concernant le choix de l'usine qui absorbera plus facilement la nouvelle variante.

Chapitre **5**

Applications industrielles

Ce chapitre a pour objectif l'expérimentation des indicateurs de convertibilité de la ligne d'assemblage automobile, introduits dans le chapitre 4, à des cas industriels réels en vue d'analyser les résultats obtenus et de les confronter à l'expertise industrielle.

Sommaire

5.1	Introduction	97
5.2	Applications des indicateurs de convertibilité	97
5.2.1	Collecte de données	97
5.2.2	Vue globale des tronçons considérés	97
5.2.3	Application de l'indicateur de la convertibilité Processus – Ressources	98
5.2.3.1	Description de l'étude de cas	98
5.2.3.2	Application du modèle	99
5.2.3.3	Analyse des résultats	100
5.2.4	Application de l'indicateur de la convertibilité Produits – Ressources	100
5.2.4.1	Description de l'étude de cas	100
5.2.4.2	Application du modèle	101
5.2.4.3	Analyse des résultats	103
5.2.5	Application de l'indicateur de la convertibilité Produits – Processus	104
5.2.5.1	Description de l'étude de cas	104
5.2.5.2	Application du modèle	104
5.2.5.3	Analyse des résultats	105
5.3	Application de l'indicateur global de la convertibilité d'une ligne d'assemblage automobile	106
5.3.1	Description de l'étude de cas	106
5.3.2	Application du modèle global de convertibilité	107
5.3.2.1	Application de l'indicateur de la convertibilité Processus – Ressources	107
5.3.2.2	Application de l'indicateur de la convertibilité Produits – Ressources	109
5.3.2.3	Application de l'indicateur de la convertibilité Produits – Processus	114
5.3.3	Analyse des résultats	117
5.4	Conclusions	121

5.1 Introduction

L'application des indicateurs de convertibilité, introduits dans le chapitre 4, représente une étape clé dans notre démarche de recherche. En effet, les applications menées au fur et à mesure du développement de chaque indicateur ont permis de l'améliorer en vue de répondre au mieux au besoin identifié. Dans le présent chapitre, nous allons présenter, tout d'abord, des exemples pour illustrer chaque indicateur de convertibilité de manière séparée. Cela permettra de mieux comprendre le type de données nécessaires et comment les modèles mathématiques sont appliqués. Ensuite, nous expérimenterons l'indicateur global de convertibilité incluant les trois indicateurs technologiques et l'étude économique sur une seule étude de cas. A l'issue des applications, les résultats obtenus seront analysés pour une meilleure compréhension des indicateurs. Cela permettra également de revenir sur certaines hypothèses et d'identifier des perspectives s'inspirant de ce travail de recherche.

5.2 Applications des indicateurs de convertibilité

5.2.1 Collecte de données

La collecte de données a été une étape primordiale tout au long de nos travaux de recherche. Certes, le concept introduit, AutoConvert, a permis de ressortir les paramètres clés de la convertibilité des lignes d'assemblage automobile, mais l'applicabilité de ses indicateurs nécessite de trouver les données sous la bonne forme. Toutefois, il n'est pas toujours facile de les trouver sous la forme souhaitée. La répartition des familles des composants telle que nous l'avons introduite rend difficile aujourd'hui l'extraction des données directement des bases de données disponibles en interne chez RENAULT. En effet, c'est la première fois qu'une étude de ce type est menée, qui combine des données d'origines différentes (produits et processus). Actuellement, les données sont répertoriées dans plusieurs bases de données, qui ne sont pas forcément connectées entre elles et par conséquent ne facilitent pas leur extraction. Pour des raisons de confidentialité, les usines considérées seront désignées par usines 1, 2, 3 et 4. Les composants concernés par l'étude ne seront pas présentés, à l'exception de quelques-uns pour faciliter la compréhension des résultats. Les coûts utilisés pour évaluer le coût de la convertibilité ne sont pas des coûts réels, toutefois, ils sont rapportés à une même base pour rester représentatifs de la réalité. Par ailleurs, les tronçons étudiés seront présentés et illustrés par des photos.

5.2.2 Vue globale des tronçons considérés

Nous allons considérer trois tronçons secondaires pour appliquer les indicateurs de convertibilité technologiques, à savoir :

- L'assemblage du moteur et de la boîte de vitesses.
- L'assemblage du groupe motopropulseur (GMP).
- L'assemblage du sous – caisse.

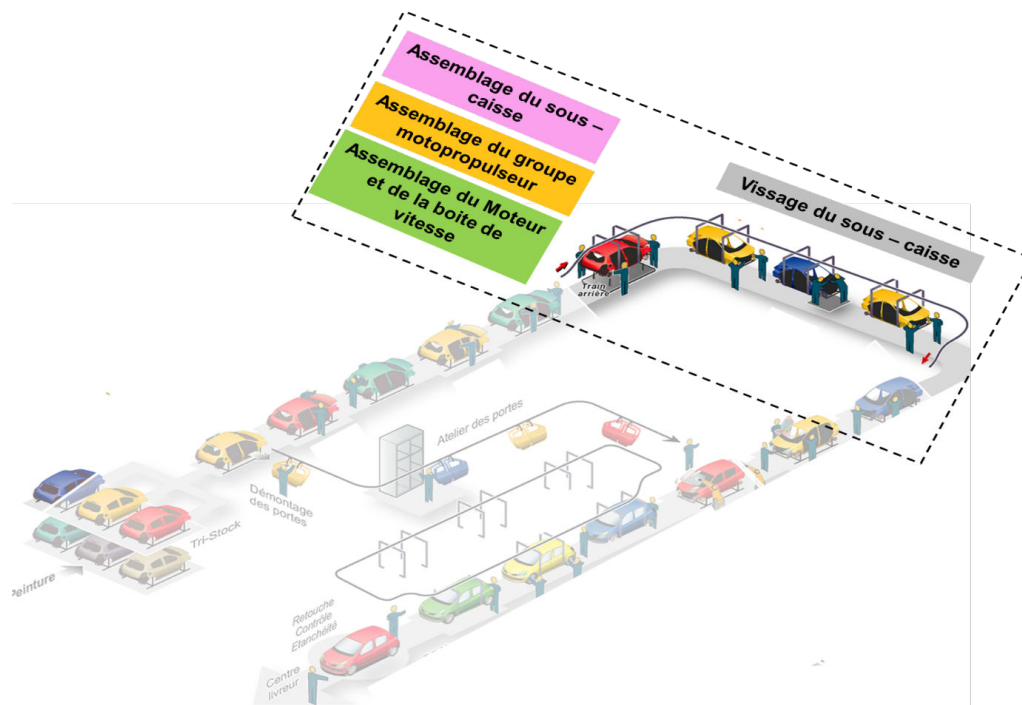


Figure 5.1 – Tronçons étudiés de l'atelier d'assemblage

Et un tronçon de la ligne principale (Voir figure 5.1) :

- Le vissage du sous – caisse.

La répartition des études de cas se fera comme suit. Dans un premier temps, l'indicateur de la convertibilité Processus – Ressources est appliqué au tronçon de l'assemblage Moteur et boîte de vitesses. Ensuite, l'indicateur Produits – Ressources est appliqué au tronçon de l'assemblage GMP. L'indicateur de convertibilité Produits – Processus, quant à lui, est appliqué au tronçon de l'assemblage du sous – caisse. Enfin, dans la troisième partie de ce chapitre, nous appliquerons l'indicateur global de convertibilité intégrant l'étude économique aux trois tronçons précités ainsi qu'au tronçon du vissage du sous-caisse.

5.2.3 Application de l'indicateur de la convertibilité Processus – Ressources

5.2.3.1 Description de l'étude de cas

Le tronçon étudié est celui de l'assemblage du moteur et de la boîte de vitesses (Voir figure 5.2). Dans ce tronçon, sont assemblés, en plus du moteur et de la boîte de vitesses, des composants tels que l'alternateur, le compresseur et le démarreur.

Pour cette étude de cas, quatre usines sont comparées. Nous allons étudier l'introduction du véhicule électrique, désigné dans l'étude par la variante v . De par sa particularité, le véhicule électrique nécessite des pas supplémentaires pour son traitement sur le tronçon de l'assemblage du GMP. L'indicateur de convertibilité Processus – Ressources a pour objectif d'identifier l'usine qui est capable d'accueillir la nouvelle variante avec un minimum de modifications dans la configuration de la ligne d'assemblage existante.



Figure 5.2 – Assemblage du moteur et de la boîte de vitesses

5.2.3.2 Application du modèle

Les données nécessaires, pour l'application de l'heuristique proposée dans le chapitre 4, sont les suivantes :

- **Nombre de pas de travail supplémentaires nécessaires** pour l'introduction de la variante v . Cette donnée est obtenue en examinant la particularité de l'assemblage de la variante v . Dans notre cas, des pas supplémentaires pour l'assemblage du véhicule électrique sont nécessaires. En effet, les quatre usines considérées n'assemblent actuellement que des véhicules thermiques.
- **Nombre de pas disponibles sur le tronçon.** Cette donnée dépend de l'année de conception de l'usine liée à l'évolution du graphe d'assemblage de référence (voir chapitre 3) et au nombre de variantes spécifiques qu'elle traite.

Pour les usines qui disposent de pas de travail disponibles, nous calculons la valeur de R , définie comme suit :

$$R = \frac{\text{Nombre de pas de travail nécessaires}}{\text{Nombre de pas de travail disponibles}} \quad (5.1)$$

La valeur de R permet de valider une première étape dans l'heuristique et de passer à la suivante, qui est de relever la valeur de X définie comme suit :

$$X = \text{Nombre de pas de travail à déplacer} \quad (5.2)$$

Le tableau 5.1 résume les informations requises pour chaque usine afin de mesurer la convertibilité Processus – Ressources quant à l'introduction de la variante v :

	Usine 1	Usine 2	Usine 3	Usine 4
Nombre de pas de travail supplémentaires nécessaires	1	2	1	1
Nombre de pas de travail disponibles	0	1	2	3
R	-	>1	<1	<1
X	-	-	6	8

Tableau 5.1 – Données de l'évaluation de la convertibilité Processus – Ressources

5.2.3.3 Analyse des résultats

Les résultats obtenus peuvent être analysés de la manière suivante :

- Les usines 1 et 2 ont une convertibilité Processus – Ressources minimale. En effet, le nombre de pas de travail disponibles sur le tronçon ne permet pas de couvrir le nombre de pas de travail nécessaires pour l'assemblage de la variante v . Dans ce cas une évaluation du coût des travaux est nécessaire pour pouvoir classer la convertibilité de ces deux usines.
- En ce qui concerne les usines 3 et 4, les concepteurs de la ligne d'assemblage ont anticipé dans leur conception initiale, la probabilité que de futurs changements surviennent et ont prévu, par conséquent, des pas de travail supplémentaires ($R < 1$). Bien que ce soit une décision qui nécessite un surinvestissement initial et qui parfois engage des coûts d'exploitation importants en raison d'un plus long cycle, elle permet de faire face aux fluctuations du marché, lorsque des situations semblables à celles de notre étude de cas se produisent.
- En se basant sur la valeur de X pour les usines qui disposent de suffisamment de pas de travail, le résultat de classification selon le degré de la convertibilité Processus – Ressources est le suivant :
 - (1) Usine 3
 - (2) Usine 4

En effet, l'usine 3 nécessite le déplacement de 6 pas de travail contre 8 pour l'usine 4. Le classement définitif des alternatives doit être complété par une étude de coût, en particulier lorsque certaines usines présentent les mêmes valeurs de X .

5.2.4 Application de l'indicateur de la convertibilité Produits – Ressources

5.2.4.1 Description de l'étude de cas

Le tronçon considéré est celui de l'assemblage du groupe motopropulseur (GMP). Dans le tronçon de l'assemblage du GMP, sont assemblés des composants tels que le radiateur, le boîtier de direction et l'écran thermique (Voir figure 5.3). Pour cette étude de cas, deux usines sont considérées.

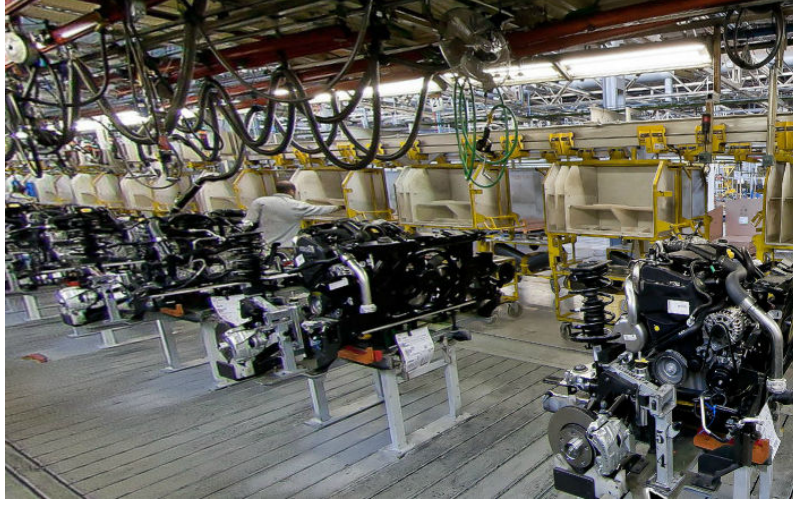


Figure 5.3 – Assemblage du GMP

L'indicateur de convertibilité Produits – Ressources a pour objectif d'identifier l'usine qui est capable d'accueillir la nouvelle variante avec un minimum de modifications dans les interfaces existantes, que ce soient les interfaces de posage, de préhension ou les interfaces outils.

5.2.4.2 Application du modèle

Les données nécessaires pour l'application de l'indicateur Produits – Ressources sont les suivantes :

- La liste des composants majeurs et le nombre de variantes par famille de composants.
- Le nombre de types d'interfaces de posage, de préhension et d'interfaces outils par famille de composants.
- La liste des nouveaux composants introduits par la variante v dans la ligne existante ainsi que les nouveaux types d'interfaces nécessaires à leur traitement.

Après avoir récupéré les données, nous appliquons pour les trois catégories d'interfaces (posage, préhension et outils) la formule de la synergie définie comme suit :

$$S = \frac{\text{Nombre total de composants avec interfaces}}{\text{Nombre total de types d'interfaces}} \quad (5.3)$$

Ensuite nous appliquons l'indicateur, introduit dans le chapitre 4, défini comme suit :

$$C_{Prod-Res} = \left(\frac{S_{après}}{S_{avant}} - 1 \right) \times 100 \quad (5.4)$$

Avec :

S_{avant} : La synergie entre les familles des composants et les interfaces avant l'introduction de la nouvelle variante

$S_{après}$: La synergie entre les familles des composants et les interfaces après l'introduction de la nouvelle variante

Les résultats de l'application sont présentés dans les tableaux 5.2 et 5.3 :

F_i	C_F	I_{tF}	I_{sF}	I_{gF}		F_i	C'_F	I'_{tF}	I'_{sF}	I'_{gF}
F_1	10	4	4	2		F_1	11	4	4	3
F_2	14	3	2	3		F_2	15	4	2	4
F_3	8	3	-	-		F_3	8	3	-	-
F_4	8	3	-	-		F_4	9	4	-	-
F_5	9	3	-	-		F_5	9	3	-	-
F_6	4	3	-	-		F_6	4	3	-	-
F_7	6	3	-	-		F_7	6	3	-	-
F_8	8	2	-	-		F_8	8	2	-	-
F_9	6	2	-	-		F_9	6	2	-	-
F_{10}	6	4	-	-		F_{10}	7	4	-	-
F_{11}	6	2	-	-		F_{11}	6	2	-	-
F_{12}	10	2	-	-		F_{12}	11	3	-	-
F_{13}	4	2	-	-		F_{13}	4	2	-	-
F_{14}	6	3	-	-		F_{14}	6	3	-	-
$S_{SIavant}$				4		$S_{SIaprès}$				4,33
$S_{GIavant}$				4,8		$S_{GIaprès}$				3,71
$S_{TIavant}$				2,69		$S_{TIaprès}$				2,62
$C_{Prod-Res,v1}$						-4%				

Tableau 5.2 – Indicateur de convertibilité Produits – Ressources pour l'usine 1

F_i	C_F	I_{tF}	I_{sF}	I_{gF}		F_i	C'_F	I'_{tF}	I'_{sF}	I'_{gF}
F_1	13	4	4	1		F_1	14	4	4	1
F_2	8	3	2	1		F_2	9	3	2	1
F_3	6	2	-	-		F_3	6	2	-	-
F_4	5	3	-	-		F_4	5	3	-	-
F_5	8	2	-	-		F_5	9	3	-	-
F_6	7	3	-	-		F_6	7	3	-	-
F_7	7	3	-	-		F_7	7	3	-	-
F_8	6	2	-	-		F_8	7	2	-	-
F_9	4	2	-	-		F_9	4	2	-	-
F_{10}	6	2	-	-		F_{10}	6	2	-	-
F_{11}	4	2	-	-		F_{11}	4	2	-	-
F_{12}	10	2	-	-		F_{12}	10	2	-	-
F_{13}	4	1	-	-		F_{13}	4	1	-	-
F_{14}	5	2	-	-		F_{14}	6	3	-	-
$S_{SIavant}$				3,5		$S_{SIaprès}$				3,83
$S_{GIavant}$				10,5		$S_{GIaprès}$				11,5
$S_{TIavant}$				2,82		$S_{TIaprès}$				2,80
$C_{Prod-Res,v2}$						+2%				

Tableau 5.3 – Indicateur de convertibilité Produits – Ressources pour l'usine 2

Avec :

F_i : La famille du composant i

C_F : Nombre de composants de la famille F_i avant l'introduction de la nouvelle variante

C'_F : Nombre de composants de la famille F_i après l'introduction de la nouvelle variante
 I_{gF} : Nombre d'interfaces de préhension de la famille F_i avant l'introduction de la nouvelle variante
 I'_{gF} : Nombre d'interfaces de préhension de la famille F_i après l'introduction de la nouvelle variante
 I_{sF} : Nombre d'interfaces de posage de la famille F_i avant l'introduction de la nouvelle variante
 I'_{sF} : Nombre d'interfaces de posage de la famille F_i après l'introduction de la nouvelle variante
 I_{tF} : Nombre d'interfaces outils de la famille F_i avant l'introduction de la nouvelle variante
 I'_{tF} : Nombre d'interfaces outils de la famille F_i après l'introduction de la nouvelle variante
 $C_{Prod-Res,vu}$: La convertibilité Produits – Ressources lorsque la variante v est introduite dans l'usine u

5.2.4.3 Analyse des résultats

Les résultats obtenus peuvent être interprétés de la manière suivante :

- L'introduction de la variante v nécessite au moins un composant supplémentaire dans les familles des composants existants. Dans l'usine 1, une partie de cette diversité est absorbée avec succès (F_{10}), tandis que d'autres composants spécifiques nécessitent l'ajout d'interfaces spécifiques (F_1, F_2, F_4 et F_{12}).
- Pour l'usine 1, de petites variations sont constatées pour les interfaces de posage et les interfaces outils. Alors que la synergie des interfaces de préhension a été considérablement réduite (-22%) à cause des interfaces de préhension spécifiques requises par les deux nouveaux composants des familles F_1 et F_2 .

$$C_{Prod-Res,v1} = \left(\frac{S_{GIaprès}}{S_{GIavant}} - 1 \right) \times 100 = -22\% \quad (5.5)$$

- $C_{Prod-Res}$ est la mesure de la convertibilité Produits – Ressources lors de l'introduction de la variante v . Elle traduit le comportement de la ligne vis-à-vis des nouveaux composants en comparant la synergie avant et après l'introduction de la nouvelle variante. Pour l'usine 2, la diversité introduite est gérée avec succès. En effet, seules de petites variations sont constatées, ce qui s'est traduit par une valeur de convertibilité Produits – Ressources positive (+ 2%). En effet, la valeur de $C_{Prod-Res}$ change en fonction du nombre d'interfaces spécifiques requises relativement aux composants spécifiques introduits. Par conséquent, cette mesure permet d'identifier l'usine qui peut lancer la production de la nouvelle variante avec un minimum de modifications sur les interfaces. Dans cette étude de cas :

$$C_{Prod-Res,v2} > C_{Prod-Res,v1} \quad (5.6)$$

Une étude de coût est nécessaire pour consolider le résultat final.

5.2.5 Application de l'indicateur de la convertibilité Produits – Processus

5.2.5.1 Description de l'étude de cas

Dans cette section, nous expérimentons le modèle de la convertibilité Produits – Processus. Deux usines sont étudiées quant à l'introduction d'une nouvelle variante v . Le tronçon considéré est celui de l'assemblage du sous – caisse (Voir figure 5.4). En effet, sur un support sont préparées toutes les pièces fixées sous la caisse ou dans le compartiment moteur comme le GMP, la ligne d'échappement, les écrans thermiques et les trains avant et arrière.



Figure 5.4 – Assemblage du sous-caisse

L'indicateur de convertibilité Produits – Processus a pour objectif d'identifier l'usine qui est capable d'accueillir la nouvelle variante avec un minimum de modifications dans la séquence d'assemblage existante.

5.2.5.2 Application du modèle

L'application du modèle nécessite, tout d'abord, d'identifier les composants majeurs du tronçon d'assemblage du sous – caisse (Voir chapitre 4). En effet, cinq familles de composants majeurs sont retenues en combinant des critères tels que le volume du composant (Nécessité d'interface de posage et/ou de préhension) et ses spécifications d'assemblage (Interface outil). Puis, nous confrontons les composants de la nouvelle variante à ceux des usines 1 et 2 pour identifier les composants spécifiques introduits. Ensuite, pour chaque composant spécifique, nous vérifions la liste des contraintes suivantes :

- Les contraintes de précedence (CP)
- Les contraintes ergonomiques (CE)
- Les contraintes de la disponibilité des composants (CDC)
- Les contraintes de la disponibilité d'outils (CDO)
- Les contraintes de la disponibilité de manutention (CDM)

La vérification des contraintes permet de mesurer l'indicateur de la convertibilité Produits

– Processus en appliquant l'équation suivante :

$$C_{Prod-Proc,vu} = \left(\frac{\sum_{i=1}^t n_i}{\sum_{i=1}^t m_i} \right) \times 100 \quad (5.7)$$

Les tableaux 5.4 et 5.5 résument les résultats obtenus :

F_i	CP	CE	CDC	CDO	CDM	n_{iv1}
F_1	1	1	1	1	1	5
F_2	1	0	1	1	0	3
F_3	1	1	1	1	1	5
F_4	1	1	1	1	1	5
F_5	1	1	1	0	1	4
$C_{Prod-Proc,v1} = 85\%$						

Tableau 5.4 – Vérification des contraintes de la convertibilité Produits - Processus pour l'usine 1

F_i	CP	CE	CDC	CDO	CDM	n_{iv1}
F_1	1	1	1	1	1	5
F_2	1	1	1	1	1	5
F_3	1	0	0	0	0	1
F_4	1	1	0	0	0	2
F_5	1	1	1	1	1	5
$C_{Prod-Proc,v2} = 65\%$						

Tableau 5.5 – Vérification des contraintes de la convertibilité Produits - Processus pour l'usine 2

Avec :

F_i est la famille du composant i .

n_{ivu} est le nombre de contraintes vérifiées du composant i de la variante v lors de son introduction dans l'usine u .

m_i est le nombre total de contraintes considérées, qui dans notre étude de cas, est égale à 20. En effet, cette valeur correspond à 4 (Le nombre composants spécifiques) multiplié par 5 (Le nombre de contraintes considérées).

5.2.5.3 Analyse des résultats

- Dans cette étude de cas, l'introduction de la variante v nécessite deux nouveaux composants à la fois dans l'usine 1 et dans l'usine 2 et seul un composant est commun entre les deux usines (le composant de la famille F_1). Par conséquent, le coefficient de similarité de Jaccard, JSC , dont nous rappelons la formule ci-après, donne la même valeur de convertibilité Produits – Processus pour les deux usines :

$$JSC_{12} = \frac{a}{a + b + c} \quad (5.8)$$

Où :

JSC_{12} est le coefficient de similarité de Jaccard entre les tronçons des usines 1 et 2

a est le nombre de composants communs entre les usines 1 et 2

b est le nombre de composants dans l'usine 1 mais pas dans l'usine 2

c est le nombre de composants dans l'usine 2 mais pas dans l'usine 1

$$JSC_{v1} = JSC_{v2} = 0,2 \quad (5.9)$$

Ainsi, le résultat obtenu ne permet pas de comparer les deux usines car seul le caractère spécifique du composant est considéré, d'où la nécessité de pondérer la spécificité de chaque composant. L'utilisation de la liste des contraintes permet, en effet, de tenir compte de considérations supplémentaires au-delà de la spécificité du composant. La vérification, ou non, de ces contraintes permet ainsi de quantifier le degré de difficulté auquel feront face les industriels lors de l'introduction d'un composant spécifique donné.

- La liste proposée des contraintes permet de quantifier le comportement de la séquence d'assemblage existante quant à l'introduction de nouveaux composants. Sa capacité à absorber cette diversité traduit son degré de convertibilité. L'application de l'indicateur Produits – Processus basé sur la vérification des contraintes identifie, dans notre étude de cas, l'usine 1 comme étant la plus convertible, avec :

$$C_{Prod-Proc,v1} > C_{Prod-Proc,v2} \quad (5.10)$$

5.3 Application de l'indicateur global de la convertibilité d'une ligne d'assemblage automobile

5.3.1 Description de l'étude de cas

Nous allons considérer dans cette dernière application les quatre tronçons illustrés dans la figure 5.1. En effet, après la préparation du moteur, de la boîte de vitesses et l'assemblage du GMP, tous les composants fixés sous la caisse ou dans le compartiment moteur sont préparés sur un support (GMP, ligne d'échappement, écrans thermiques, trains avant et arrière, réservoir, tuyauteries...). Ce support est amené sous le véhicule pour vérifier que tous les composants se positionnent correctement (Voir figure 5.5). Puis, arrive l'opération de vissage qui s'opère soit de manière manuelle ou automatique selon les usines.

La variante, v , considérée est un véhicule thermique lancé récemment par RENAULT. Sa particularité réside dans le fait qu'il utilise une plateforme déjà existante sur le marché et qui n'est pas conforme au standard de conception RENAULT. Nous considérons pour cette expérimentation quatre usines avec différentes localisations géographiques. Pour les quatre usines, on estime que les travaux nécessaires pour l'introduction de la nouvelle variante peuvent être réalisés pendant les périodes de fermeture annuelle des usines. Par conséquent :

$$\text{Nombre de jours d'arrêt de production} \times \text{Manque à gagner journalier} = 0 \quad (5.11)$$



Figure 5.5 – Vissage du sous – caisse

5.3.2 Application du modèle global de convertibilité

5.3.2.1 Application de l'indicateur de la convertibilité Processus – Ressources

La spécificité du véhicule introduit des pas de travail supplémentaires dans les quatre usines considérées. En effet, ces pas de travail sont le résultat de l'introduction d'une nouvelle plateforme véhicule. En conséquence, deux pas sont nécessaires dans le tronçon de l'assemblage du moteur et de la boîte de vitesses, un pas dans le tronçon de l'assemblage du GMP et un pas de travail supplémentaire dans le tronçon du vissage du sous – caisse. L'application de l'heuristique de l'indicateur Processus - Ressources est présentée dans le tableau 5.6.

Quand le nombre de pas disponibles couvre entièrement le nombre de pas de travail nécessaires, nous considérons que la convertibilité Processus - Ressources est maximale et égale à 100% (Exemple de l'usine 2). De la même manière, si le nombre de pas disponibles ne couvrent que la moitié du nombre de pas nécessaires, la valeur de la convertibilité Processus - Ressources dans ce cas est de 50% (Exemple de l'usine 4). Le tableau 5.7 présente le degré de convertibilité Processus - Ressources pour les quatre usines considérées.

	Usine 1	Usine 2	Usine 3	Usine 4
Assemblage du moteur et de la boîte de vitesses				
Nombre de pas de travail supplémentaires nécessaires	2	2	2	2
Nombre de pas de travail disponibles	1	6	0	2
R	>1	<1	-	=1
X	-	6	-	5
Assemblage du GMP				
Nombre de pas de travail supplémentaires nécessaires	1	1	1	1
Nombre de pas de travail disponibles	0	5	1	0
R	-	<1	=1	-
X	-	3	4	-
Assemblage du sous – caisse				
Nombre de pas de travail supplémentaires nécessaires	0	0	0	0
Nombre de pas de travail disponibles	-	-	-	-
R	-	-	-	-
X	-	-	-	-
Vissage du sous – caisse				
Nombre de pas de travail supplémentaires nécessaires	1	1	1	1
Nombre de pas de travail disponibles	0	3	0	0
R	>1	<1	-	-
X	-	5	-	-

Tableau 5.6 – Données de l'évaluation de la convertibilité Processus – Ressources

	Usine 1	Usine 2	Usine 3	Usine 4
Nombre de pas de travail nécessaires	4	4	4	4
Nombre de pas de travail disponibles	1	14	1	2
$C_{Proc-Res,vu}$	25%	100%	25%	50%

Tableau 5.7 – Convertibilité Processus – Ressources des quatre usines considérées

Le résultat obtenu permet d'appliquer l'indicateur du coût de la convertibilité Processus – Ressources dont nous rappelons la formule ci-après :

$$\hat{C}_{Proc-Res,vu} = \text{Investissement initial} + \text{Nombre de jours d'arrêt de production} \times \text{Manque à gagner journalier} \quad (5.12)$$

L'investissement initial inclut le coût des travaux de génie civil pour l'ajout de pas de travail (≈ 50 k€ par pas de travail) et le coût de déplacement des pas de travail (≈ 2 k€ par pas de travail déplacé). Ce dernier est négligé pour les usines qui engagent déjà des travaux de génie civil.

	Usine 1	Usine 2	Usine 3	Usine 4
$\hat{C}_{Proc-Res,vu}$ (k€)	150	28	150	100

Tableau 5.8 – Coût de la convertibilité Processus – Ressources

5.3.2.2 Application de l'indicateur de la convertibilité Produits – Ressources

Pour l'application de l'indicateur Produits – Ressources, nous disposons de 35 familles de composants, réparties respectivement en 14, 14, 5 et 2 pour les tronçons assemblage du moteur et de la boîte de vitesses, assemblage du GMP, assemblage du sous – caisse et celui du vissage du sous – caisse.

F_i	C_F	I_{tF}	I_{sF}	I_{gF}		F_i	C'_F	I'_{tF}	I'_{sF}	I'_{gF}
Assemblage du moteur et de la boîte de vitesses										
F_1	6	3	4	1		F_1	9	3	7	1
F_2	12	2	2	1		F_2	15	3	3	1
F_3	6	1	-	-		F_3	6	1	-	-
F_4	8	2	-	-		F_4	9	3	-	-
F_5	11	2	-	-		F_5	11	2	-	-
F_6	6	2	-	-		F_6	6	2	-	-
F_7	3	2	-	-		F_7	3	2	-	-
F_8	6	2	-	-		F_8	6	2	-	-
F_9	10	2	-	-		F_9	10	2	-	-
F_{10}	8	3	-	-		F_{10}	9	4	-	-
F_{11}	13	1	-	-		F_{11}	14	1	-	-
F_{12}	5	2	-	-		F_{12}	5	2	-	-
F_{13}	16	3	-	-		F_{13}	16	3	-	-
F_{14}	12	2	-	-		F_{14}	12	2	-	-
Assemblage du GMP										
F_1	2	-	2	-		F_1	3	-	3	-
F_2	5	2				F_2	5	2	-	-
F_3	11	3	-	-		F_3	12	3	-	-
F_4	7	3	1	-		F_4	8	3	1	-
F_5	11	3	-	-		F_5	12	3	-	-
F_6	10	3	-	3		F_6	11	3	-	3
F_7	9	3	-	-		F_7	9	3	-	-
F_8	7	3	-	-		F_8	7	3	-	-
F_9	9	2	-	-		F_9	9	2	-	-
F_{10}	3	3	-	-		F_{10}	3	3	-	1
F_{11}	7	2	-	-		F_{11}	7	2	-	-
F_{12}	10	3	-	-		F_{12}	10	3	-	-
F_{13}	10	2	5	3		F_{13}	11	2	5	3
F_{14}	9	3	-	-		F_{14}	9	3	-	-
Assemblage du sous-caisse										
F_1	8	3	1	1		F_1	9	3	1	1
F_2	6	2	2	1		F_2	7	2	2	1
F_3	7	2	3	-		F_3	8	2	3	-
F_4	12	1	3	1		F_4	13	1	4	1
F_5	8	2	-	-		F_5	9	2	-	-
Vissage du sous-caisse										
F_1	23	2				F_1	23	2		
F_2	25	2				F_2	25	2		
$S_{SIavant}$				3		$S_{SIaprès}$				2,9
$S_{GIavant}$				5,6		$S_{GIaprès}$				6,5
$S_{TIavant}$				4,1		$S_{TIaprès}$				4,2
$C_{Prod-Res,v1}$						$+2\%$				

Tableau 5.9 – Indicateur de convertibilité Produits – Ressources pour l'usine 1

F_i	C_F	I_{tF}	I_{sF}	I_{gF}		F_i	C'_F	I'_{tF}	I'_{sF}	I'_{gF}
Assemblage du moteur et de la boîte de vitesses										
F_1	5	3	5	1		F_1	8	3	8	1
F_2	13	2	2	1		F_2	16	4	3	1
F_3	4	1	-	-		F_3	4	1	-	-
F_4	6	2	-	-		F_4	7	2	-	-
F_5	14	3	-	-		F_5	14	3	-	-
F_6	7	2	-	-		F_6	7	2	-	-
F_7	5	2	-	-		F_7	5	2	-	-
F_8	4	2	-	-		F_8	4	2	-	-
F_9	8	2	-	-		F_9	8	2	-	-
F_{10}	6	2	-	-		F_{10}	7	2	-	-
F_{11}	9	1	-	-		F_{11}	10	1	-	-
F_{12}	7	2	-	-		F_{12}	7	2	-	-
F_{13}	13	3	-	-		F_{13}	13	3	-	-
F_{14}	5	2	-	-		F_{14}	5	2	-	-
Assemblage du GMP										
F_1	2		2			F_1	3		3	
F_2	10	4				F_2	10	4		
F_3	14	3	-	-		F_3	15	4	-	-
F_4	8	3	1	-		F_4	9	3	1	-
F_5	8	3	-	-		F_5	8	3	-	-
F_6	7	3	-	4		F_6	9	3	-	4
F_7	5	1	-	-		F_7	5	1	-	-
F_8	8	3	-	-		F_8	8	3	-	-
F_9	12	3	-	-		F_9	12	3	-	-
F_{10}	3	3	-	1		F_{10}	3	3	-	1
F_{11}	6	1	-	-		F_{11}	6	1	-	-
F_{12}	15	2	-	-		F_{12}	15	2	-	-
F_{13}	7	1	4	2		F_{13}	8	1	4	2
F_{14}	7	1	-	-		F_{14}	7	1	-	-
Assemblage du sous-caisse										
F_1	10	3	1	1		F_1	11	4	1	1
F_2	7	2	2	1		F_2	8	2	3	1
F_3	6	2	2	-		F_3	7	3	2	-
F_4	9	1	4	1		F_4	10	1	4	1
F_5	11	1	-	-		F_5	12	1	-	-
Vissage du sous-caisse										
F_1	18	1				F_1	18	1		
F_2	21	2				F_2	21	2		
$S_{SIavant}$				2,9		$S_{SIaprès}$				2,8
$S_{GIavant}$				5,1		$S_{GIaprès}$				6,1
$S_{TIavant}$				4,2		$S_{TIaprès}$				4,2
$C_{Prod-Res,v2}$						0%				

Tableau 5.10 – Indicateur de convertibilité Produits – Ressources pour l'usine 2

F_i	C_F	I_{tF}	I_{sF}	I_{gF}		F_i	C'_F	I'_{tF}	I'_{sF}	I'_{gF}
Assemblage du moteur et de la boîte de vitesses										
F_1	5	3	3	1		F_1	8	3	6	1
F_2	12	3	3	1		F_2	15	3	3	1
F_3	7	1	-	-		F_3	7	1	-	-
F_4	15	3	-	-		F_4	16	4	-	-
F_5	5	2	-	-		F_5	5	2	-	-
F_6	7	2	-	-		F_6	7	2	-	-
F_7	6	2	-	-		F_7	6	2	-	-
F_8	5	1	-	-		F_8	5	1	-	-
F_9	4	2	-	-		F_9	4	2	-	-
F_{10}	9	2	-	-		F_{10}	10	3	-	-
F_{11}	13	1	-	-		F_{11}	14	1	-	-
F_{12}	10	2	-	-		F_{12}	10	2	-	-
F_{13}	23	2	-	-		F_{13}	23	2	-	-
F_{14}	15	3	-	-		F_{14}	15	3	-	-
Assemblage du GMP										
F_1	2		2			F_1	3		3	
F_2	8	4				F_2	8	4		
F_3	12	3	-	-		F_3	13	4	-	-
F_4	13	3	2	-		F_4	14	3	2	-
F_5	7	2	-	-		F_5	8	2	-	-
F_6	14	3	-	5		F_6	15	3	-	5
F_7	7	3	-	-		F_7	7	3	-	-
F_8	11	4	-	-		F_8	11	4	-	-
F_9	3	3	-	-		F_9	3	3	-	-
F_{10}	2	2	-	1		F_{10}	2	2	-	1
F_{11}	4	1	-	-		F_{11}	4	1	-	-
F_{12}	7	2	-	-		F_{12}	7	2	-	-
F_{13}	8	2	4	2		F_{13}	9	2	4	2
F_{14}	9	3	-	-		F_{14}	9	3	-	-
Assemblage du sous-caisse										
F_1	9	3	1	1		F_1	10	3	1	1
F_2	12	2	2	1		F_2	13	2	2	2
F_3	6	2	2	-		F_3	6	2	2	-
F_4	11	1	2	1		F_4	12	2	3	1
F_5	9	1	-	-		F_5	10	1	-	-
Vissage du sous-caisse										
F_1	20	2				F_1	20	2		
F_2	23	2				F_2	23	2		
$S_{SIavant}$				3,71		$S_{SIaprès}$				3,68
$S_{GIavant}$				5,92		$S_{GIaprès}$				7,63
$S_{TIavant}$				4,32		$S_{TIaprès}$				4,34
$C_{Prod-Res,v3}$						+3%				

Tableau 5.11 – Indicateur de convertibilité Produits – Ressources pour l'usine 3

F_i	C_F	I_{tF}	I_{sF}	I_{gF}		F_i	C'_F	I'_{tF}	I'_{sF}	I'_{gF}
Assemblage du moteur et de la boîte de vitesses										
F_1	7	3	3	1		F_1	10	3	4	1
F_2	13	2	3	1		F_2	16	2	3	1
F_3	5	1	-	-		F_3	5	1	-	-
F_4	14	2	-	-		F_4	15	2	-	-
F_5	6	2	-	-		F_5	6	2	-	-
F_6	2	1	-	-		F_6	2	1	-	-
F_7	8	2	-	-		F_7	8	2	-	-
F_8	9	2	-	-		F_8	9	2	-	-
F_9	3	1	-	-		F_9	3	1	-	-
F_{10}	10	2	-	-		F_{10}	11	2	-	-
F_{11}	6	1	-	-		F_{11}	9	1	-	-
F_{12}	13	2	-	-		F_{12}	13	2	-	-
F_{13}	8	2	-	-		F_{13}	6	2	-	-
F_{14}	9	2	-	-		F_{14}	9	2	-	-
Assemblage du GMP										
F_1	1		1			F_1	2		2	
F_2	3	3				F_2	3	3		
F_3	11	3	-	-		F_3	12	3	-	-
F_4	10	3	1	-		F_4	10	3	-	-
F_5	8	3	-	-		F_5	9	2	-	-
F_6	9	2	-	5		F_6	11	2	-	5
F_7	11	3	-	-		F_7	11	3	-	-
F_8	6	3	-	-		F_8	6	3	-	-
F_9	7	3	-	-		F_9	7	3	-	-
F_{10}	5	2	-	-		F_{10}	5	2	-	1
F_{11}	9	2	-	-		F_{11}	9	2	-	-
F_{12}	10	2	-	-		F_{12}	10	2	-	-
F_{13}	10	2	4	2		F_{13}	11	2	4	2
F_{14}	12	2	-	-		F_{14}	12	2	-	-
Assemblage du sous-caisse										
F_1	12	3	1	1		F_1	13	4	1	1
F_2	11	2	2	1		F_2	12	2	2	1
F_3	9	2	2	-		F_3	10	2	2	-
F_4	12	1	4	1		F_4	13	2	4	1
F_5	13	1	-	-		F_5	14	1	-	-
Vissage du sous-caisse										
F_1	24	2				F_1	24	2		
F_2	19	2				F_2	19	2		
$S_{SIavant}$				4		$S_{SIaprès}$				4,53
$S_{GIavant}$				7,4		$S_{GIaprès}$				8,6
$S_{TIavant}$				4,6		$S_{TIaprès}$				4,73
$C_{Prod-Res,v4}$						+6%				

Tableau 5.12 – Indicateur de convertibilité Produits – Ressources pour l'usine 4

Les lignes, des tableaux 5.9, 5.10, 5.11 et 5.12, colorées en gris représentent les composants spécifiques introduits. Nous constatons que le tronçon de l'assemblage du sous - caisse est particulièrement perturbé par l'introduction de cette nouvelle plateforme, car quasiment tous les composants majeurs de ce tronçon sont impactés. Le résultat obtenu permet d'appliquer l'indicateur du coût de la convertibilité Processus – Ressources dont nous rappelons la formule ci-après :

$$\begin{aligned} \hat{C}_{Prod-Res,vu} = & \text{Investissement initial} \\ & + \sum_{i=1}^n (\text{Prix par interface} \times \text{Nombre d'interfaces}) \\ & + \text{Nombre de jours d'arrêt de production} \times \text{Manque à gagner journalier} \end{aligned} \quad (5.13)$$

Avec n le nombre de types d'interfaces à introduire.

Si l'on considère l'usine 4, on a besoin d'un investissement de 520 k€ qui correspond aux données suivantes :

- 1 interface de posage pour le moteur. Le nombre à introduite, de ce type d'interfaces, dépend de la capacité de production installée. Pour notre cas, nous aurons besoin de 50 nouvelles unités estimées à $\approx 1\text{k€} \times 50 = 50\text{k€}$.
- 1 interface de posage pour le GMP. Le nombre de ce type d'interfaces dépend également de la capacité de production installée. Elles sont estimées à $\approx 3\text{k€} \times 50 = 150 \text{ k€}$.
- Un investissement initial lié à la mise en place d'une fonction de tri pour les interfaces de posage du GMP, estimé à $\approx 300\text{k€}$
- 0 interface de préhension
- 2 interfaces outils ($\approx 2 * 10\text{k€}$)

De la même manière, le coût de la convertibilité Produits – Ressources est évalué pour les usines 1, 2 et 3.

	Usine 1	Usine 2	Usine 3	Usine 4
$\hat{C}_{Prod-Res,vu}$ (k€)	340	365	330	520

Tableau 5.13 – Coût de la convertibilité Produits – Ressources

5.3.2.3 Application de l'indicateur de la convertibilité Produits – Processus

L'introduction de la nouvelle variante a entraîné des modifications dans le processus d'assemblage. En effet, certaines opérations d'assemblage, notamment pour les composants sous - caisse, ne sont plus réalisées au même endroit et donc ne vérifient plus les contraintes de précedence. En outre, la diversité de certains composants volumineux, tels que le moteur, la boîte

de vitesses et le réservoir provoque, dans certaines usines compactes, un problème par rapport à la disponibilité du composant en bord de chaîne. En outre, pour d'autres composants des difficultés de manutention et de la disponibilité de visseuses sont constatées. Après vérification de l'ensemble des contraintes pour les composants majeurs des quatre tronçons, nous dressons le tableau 5.14 :

	Usine 1	Usine 2	Usine 3	Usine 4
F_i	n_{iv1}	n_{iv3}	n_{iv3}	n_{iv4}
Assemblage du moteur et de la boîte de vitesses				
F_1	3	3	3	3
F_2	4	4	4	3
F_3	5	5	5	5
F_4	5	5	5	5
F_5	5	5	5	5
F_6	5	5	5	5
F_7	5	5	5	5
F_8	5	5	5	5
F_9	5	5	5	5
F_{10}	5	5	5	5
F_{11}	5	5	5	5
F_{12}	5	5	5	5
F_{13}	5	5	5	5
F_{14}	5	5	5	5
Assemblage du GMP				
F_1	5	5	5	5
F_2	5	5	5	5
F_3	5	5	5	5
F_4	4	3	5	5
F_5	5	5	5	5
F_6	5	5	5	5
F_7	5	5	5	5
F_8	5	5	5	5
F_9	5	5	5	5
F_{10}	5	5	5	5
F_{11}	5	5	5	5
F_{12}	5	5	5	5
F_{13}	4	4	5	3
F_{14}	4	5	5	4
Assemblage du sous-caisse				
F_1	3	4	5	5
F_2	3	3	5	5
F_3	3	3	4	4
F_4	3	3	4	4
F_5	5	5	5	5
Vissage du sous-caisse				
F_1	5	5	5	5
F_2	5	5	5	5
	$C_{Prod-Proc,v1} = 69\%$	$C_{Prod-Proc,v2} = 73\%$	$C_{Prod-Proc,v3} = 82\%$	$C_{Prod-Proc,v4} = 71\%$

Tableau 5.14 – Indicateur de convertibilité Produits – Processus

La base de comparaison des quatre usines est constituée des composants majeurs correspondant aux lignes colorées en gris, à savoir :

- F_1 et F_2 pour l'assemblage du moteur et de la boîte de vitesses
- F_4 , F_{13} et F_{14} pour l'assemblage du GMP
- F_1 , F_2 , F_3 et F_4 pour l'assemblage du sous - caisse

Le résultat obtenu permet d'appliquer l'indicateur du coût de la convertibilité Produits – Processus dont nous rappelons la formule ci-après :

$$\hat{C}_{Prod-Proc,vu} = \text{Ecart du coût d'exploitation entre la nouvelle variante et les variants existantes} \quad (5.14)$$

L'écart du coût d'exploitation est évalué par le nombre d'opérateurs supplémentaires nécessaires pour faire face aux contraintes non vérifiées. Ce coût dépend également de la localisation géographique de l'usine. Par exemple, dans l'usine 3, le vissage du sous - caisse se fait de manière manuelle contrairement au reste des usines. Par conséquent, le nombre d'opérateurs nécessaires est de 6 contre 8 opérateurs pour les usines 1, 2 et 4. En effet, les opérateurs déjà en place peuvent facilement s'adapter à de nouvelles spécifications de vissage contrairement au cas où le vissage se faisait de manière automatique. En outre, la localisation géographique est un deuxième point avantageux pour l'usine 3, caractérisée par une main d'œuvre moins chère. Ainsi, le coût de la convertibilité Produits - Processus de cette usine est estimé à $\approx 30 \text{ k€} * 6 = 180 \text{ k€}$. De la même manière, le coût de la convertibilité Produits - Processus est évalué pour les usines 1,2 et 4 (Voir tableau 5.15).

	Usine 1	Usine 2	Usine 3	Usine 4
$\hat{C}_{Prod-Proc,vu}(\text{k€})$	360	400	180	400

Tableau 5.15 – Coût de la convertibilité Produits – Processus

5.3.3 Analyse des résultats

Avant d'analyser les résultats obtenus, il est nécessaire de rappeler les particularités de la nouvelle variante v . En effet, celle-ci introduit une nouvelle plateforme et impacte la convertibilité de la ligne d'assemblage sur les trois niveaux de convertibilité identifiés. La nouvelle variante introduit ainsi une diversité de composants et nécessite un nombre d'interfaces spécifiques (Convertibilité Produits – Ressources). Elle a également entraîné une perturbation au niveau des séquences d'assemblage existantes en violant, entre autres, des contraintes de précédence et des contraintes de disponibilité du composant (convertibilité Produits – Processus). Son introduction requiert des investissements lourds en termes d'ajout de pas de travail (Convertibilité Processus – Ressources). Le tableau 5.16 résume les résultats obtenus après application directe des indicateurs technologiques de la convertibilité des lignes d'assemblage :

	$C_{Prod-Res}$	$C_{Proc-Res}$	$C_{Prod-Proc}$
Usine 1	2%	25%	69%
Usine 2	0%	100%	73%
Usine 3	3%	25%	82%
Usine 4	6%	50%	71%

Tableau 5.16 – Résultats des indicateurs technologiques

Avec :

$C_{Prod-Res}$: Indicateur de convertibilité Produits – Ressources

$C_{Proc-Res}$: Indicateur de convertibilité Processus – Ressources

$C_{Prod-Proc}$: Indicateur de convertibilité Produits – Processus

Ces premiers résultats permettent de tirer les conclusions suivantes :

- L'introduction de la nouvelle variante a permis d'améliorer la synergie de trois usines, plus particulièrement celle de l'usine 4. En effet, cela est en partie dû au fait que certains composants de la variante du véhicule sont déjà assemblés dans l'usine 4 (Exemple : moteur).
- L'usine 2 est une usine qui dispose d'un grand nombre de pas de travail disponibles d'où le fait que sa convertibilité Processus – Ressources est maximale(100%). Les usines 1 et 3 sont des usines compactes, elles possèdent très peu de pas non utilisés, ce qui explique leur faible convertibilité Processus - Ressources (25%).
- L'usine 3 est la plus convertible en terme de convertibilité Produits – Processus. En effet, les opérations dans cette usine sont fortement manuelles et permettent de faire face aux contraintes de précédence violées.

Cette première étape ne permet pas d'identifier l'usine qui absorbera plus facilement la diversité introduite par la variante v , ce qui consolide encore plus la nécessité de mener une étude de coût pour prendre la décision finale. Or, elle permet d'identifier les principaux éléments qui impactent le degré de convertibilité des tronçons considérés. Le tableau 5.17 compare les résultats obtenus suite à l'étude du coût de convertibilité des quatre usines concernées par l'introduction de la variante v :

	$\widehat{C}_{Prod-Res}$	$\widehat{C}_{Proc-Res}$	$\widehat{C}_{Prod-Proc}$	I_c
Usine 1 (k€)	340	150	360	850
Usine 2 (k€)	365	28	400	793
Usine 3 (k€)	330	150	180	660
Usine 4 (k€)	520	100	400	1020

Tableau 5.17 – Résultats de l'indicateur de coût

Avec :

$\hat{C}_{Prod-Res}$: Coût de la convertibilité Produits – Ressources

$\hat{C}_{Proc-Res}$: Coût de la convertibilité Processus – Ressources

$\hat{C}_{Prod-Proc}$: Coût de la convertibilité Produits – Processus

I_c : Indicateur global du coût de convertibilité

Les résultats de l'étude économique montrent que l'usine 3 est la plus convertible pour accueillir la nouvelle plateforme de la variante v . En effet, les atouts de cette usine sont essentiellement liés au fait que les opérations d'assemblages sont fortement manuelles. Ceci consolide notre hypothèse sur la convertibilité maximale de l'opérateur. L'autre facteur influent est la localisation géographique, qui a réduit considérablement le coût de la convertibilité de l'usine 3, grâce à une main d'œuvre moins chère comparées au reste des usines.

Nous constatons également que l'écart de coût de convertibilité entre les usines 1 et 2 n'est pas très important (+7%). Elles pourraient donc être considérées au même niveau de convertibilité. L'usine 4, quant à elle, est la moins convertible avec un écart de coût de +30% par rapport à l'usine 3. Cet écart de coût est lié à la mise en place de la fonction de tri pour le composant GMP.

Nous pourrions ainsi classer les quatre usines considérées selon leur degré de convertibilité comme suit :

- (1) Usine 3
- (2) Usines 1 et 2
- (3) Usine 4

Suite à cette expérimentation, nous avons relevé un nombre de conclusions que nous listons ci-après :

- Les usines compactes sont des usines qui ne disposent pas d'un grand nombre de pas de travail et possèdent une surface au sol limitée. Cette compacité est pénalisante en terme de convertibilité Processus – Ressources. En effet, dans ce type d'usine, il devient difficile, voire impossible (manque d'espace au sol), d'ajouter des pas de travail en vue d'introduire une nouvelle variante. La compacité de l'usine pourrait également constituer un frein à la convertibilité Produits – Processus, notamment par rapport à la disponibilité des composants en bord de chaîne. Par conséquent, une usine compacte reste convertible quand il s'agit d'introduire des variantes de véhicules relativement similaires à celles déjà en place et ne peut donc pas accueillir des variantes avec une conception en rupture.
- Les usines qui sont faiblement automatisées sont plus convertibles en terme de convertibilité Produits – Processus car un processus manuel facilite l'absorption de la diversité des composants et la dérogation de certaines contraintes.
- Dans notre étude, certains composants introduisent plus qu'une diversité dans la ligne

existante, tels que le moteur et la boîte de vitesses. Par conséquent, cette catégorie de composants impacte davantage la convertibilité Produits – Ressources. Dans notre exemple, la famille des moteurs, F_1 , de la variante v , introduit trois diversités de moteurs et nécessite par conséquent trois interfaces spécifiques dans les usines 1, 2 et 3. Cependant, dans l'usine 4, elle n'introduit qu'une seule diversité de moteur car les deux autres types de moteur sont déjà assemblés sur les véhicules existants dans l'usine.

- L'ajout de certaines interfaces spécifiques nécessite un investissement plus important que d'autres. En effet, nous pouvons distinguer les interfaces outils et les interfaces de préhension, qui sont introduites de manière unitaire (exemple : une visseuse pour l'assemblage du compresseur) et les interfaces de posage, dont le nombre requis dépend de la capacité de production installée (exemple : l'interface de posage du moteur). Les interfaces de posage peuvent être également classées en deux types. Le premier concerne les interfaces de posage qui ne nécessitent pas de fonction de tri, nous citons l'exemple de l'interface de posage du moteur ; le tri de ce type d'interfaces est effectué à la main par l'opérateur car il s'agit d'une interface légère et peu volumineuse. Le deuxième type concerne les interfaces de posage qui exigent une fonction de tri, nous citons l'exemple de l'interface de posage du GMP, qui est une interface lourde et très volumineuse (Voir figure 5.6).

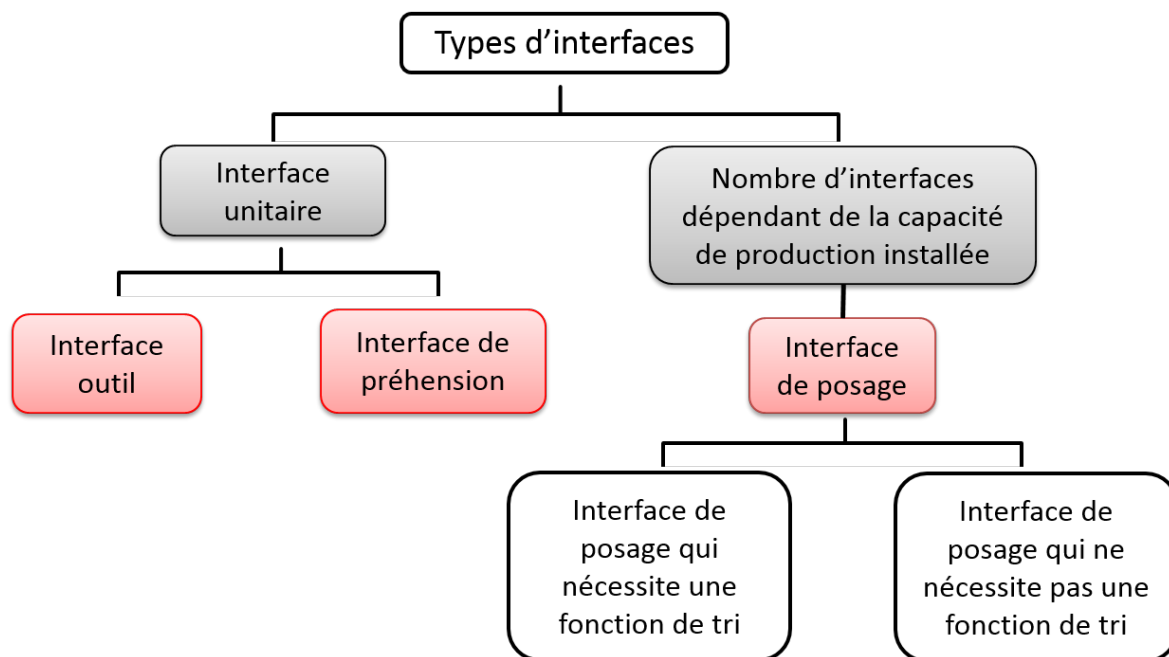


Figure 5.6 – Types d'interfaces Produits - Ressources

Par conséquent, nous pouvons classer les composants majeurs en trois niveaux de hiérarchisation dépendant de la spécificité de l'interface requise et de son impact sur le coût de la convertibilité de la ligne d'assemblage (Voir tableau 5.18).

Niveau de hiérarchisation	Type d'interface	Description du composant	Exemple
1	Interface outil	Composant nécessitant une interface outil spécifique unitaire	Compresseur spécifique introduisant une nouvelle visseuse
	Interface de préhension	Composant nécessitant une interface de préhension spécifique unitaire	Assistance de préhension du moteur
2	Interface de posage	Composant nécessitant une interface de posage spécifique, dont le nombre dépend de la capacité de production installée	Moteur introduisant une nouvelle interface de posage
3	Interface de posage	Composant nécessitant une interface de posage spécifique dépendant de la capacité de production installée et nécessitant une fonction de tri	GMP nécessitant une nouvelle interface de posage dans une usine qui ne dispose pas d'une fonction de tri

Tableau 5.18 – Hiérarchisation des composants

5.4 Conclusions

Les applications présentées dans ce chapitre constituent une étape principale pour la validation des indicateurs introduits dans nos travaux de recherche. En effet, au cours de ce chapitre, nous avons appliqué les indicateurs de convertibilité, à savoir l'indicateur Produits – Processus, l'indicateur Processus – Ressources et l'indicateur Produits – Ressources, à quatre cas industriels d'une ligne d'assemblage automobile. Nous avons intégré dans le choix des tronçons étudiés une partie des tronçons des lignes secondaires et une autre de la ligne principale afin d'expérimenter les modèles mathématiques sur des cas d'application représentatifs de l'ensemble de l'atelier d'assemblage. Ces expérimentations ont permis de montrer l'efficacité des indicateurs en vue d'identifier l'usine la plus convertible quant à l'introduction d'une nouvelle variante.

Les résultats obtenus sont en adéquation avec l'expertise industrielle et constitue un support d'aide à la décision pour une sélection rapide et argumentée de la meilleure alternative. Elles ont également permis de soulever un nombre de remarques en vue d'améliorer la robustesse des indicateurs et de consolider le concept AutoConvert. Nous listons, ci-après, les principales remarques soulevées qui représenteront une base pour construire les perspectives de ce travail de recherche :

- La conception initiale de l'usine constitue un élément important dans l'évaluation de son degré de convertibilité. En effet, il peut parfois constituer un frein (Espace au sol très restreint pour les usines compactes) et parfois un facilitateur (faible degré d'automatisation). D'où la nécessité de concevoir des usines à convertibilité ajustée, l'objectif ne

devrait donc pas être de fournir une convertibilité maximale, mais plutôt l'identification et la mise en œuvre d'un degré de convertibilité optimal spécifique à chaque usine, en trouvant le bon compromis entre convertibilité, performance économique et pérennité de l'usine.

- L'application des modèles de convertibilité aux tronçons d'assemblage considérés a permis de hiérarchiser les composants majeurs selon trois niveaux. En effet, les trois niveaux de hiérarchisation identifiés dépendent du type d'interface spécifique nécessaire à l'introduction du composant. Par conséquent, cela pourrait réduire le nombre de composants majeurs considérés et donc de permettre une collecte de données plus rapide pour un résultat très en amont du projet.
- La localisation géographique de l'usine a un impact important sur le coût de la convertibilité souhaitée. En effet, le coût des travaux de modifications et de la main d'œuvre peut différer d'une manière importante d'un pays à l'autre ($\approx 30\%$ par rapport aux usines considérées dans notre étude de cas).
- Nous avons pris pour hypothèse, dans la construction du concept AutoConvert et des indicateurs qui en découlent, que l'opérateur est 100% convertible. Cette hypothèse a été confirmée pendant les applications où certaines modifications lourdes ont été facilement absorbées par l'opérateur, nous citons l'exemple où les contraintes de précédence ont facilement été dérogées dans le cas d'un vissage sous – caisse manuel et l'exemple où l'opérateur a remplacé la fonction de tri pour les interfaces de posage du moteur. Or, nous estimons que cette convertibilité a forcément une limite à partir d'un seuil de complexité donné. Cette déduction constituera une base pour la proposition de l'une des perspectives de ce travail de recherche, qui seront présentées en détail dans le chapitre suivant.

Conclusions et perspectives

L'objet de ce chapitre est la présentation des contributions de cette thèse et la discussion des éventuelles perspectives s'inspirant de ce travail de recherche.

Conclusion générale

La problématique scientifique de cette thèse consiste en l'étude de la convertibilité des lignes d'assemblage automobile en vue de faire face à la diversité des produits. Avant de synthétiser la réponse à la problématique, reprenons tout d'abord les différents travaux menés dans le cadre de cette thèse.

Nous avons, dans un premier temps, étudié et analysé, dans le chapitre I, les différents critères de la performance. En effet, ce chapitre résume les différentes étapes conduites pas à pas avec l'entreprise en vue de formuler son besoin et par conséquent centrer et orienter nos travaux de recherche pour apporter les solutions adéquates. Les résultats de ce premier chapitre ont permis d'analyser les principaux mots clé du sujet de la thèse à savoir la **performance**, l'**innovation** et la **pérennité**, et de l'enrichir avec des mots clés supplémentaires comme la **flexibilité** et la **gestion de la diversité**. Dans le contexte concurrentiel actuel, la flexibilité est devenue l'un des critères les plus importants de la performance industrielle. Les industriels doivent se doter aujourd'hui de systèmes de production flexibles capables d'absorber la diversité des produits et faire face aux exigences des clients qui sont en constante évolution.

Dans le second chapitre, nous avons exploité les résultats de l'analyse du sujet de thèse, présenté dans le chapitre I, pour mener une étude bibliographique sur les trois mots clés identifiés à savoir **les systèmes de production**, **la gestion de la diversité** et **la flexibilité**. La revue de la littérature a permis, d'une part, de délimiter le périmètre de notre contribution, et d'apporter ainsi un référentiel scientifique pour mieux positionner nos travaux de recherche. Ce travail a permis d'enlever l'ambiguïté autour du terme « flexibilité », due aux multiples définitions et appellations utilisées dans la littérature pour la désigner. Et d'autre part, de relever plusieurs points importants et pistes de réflexion, sur lesquels nous nous sommes basés pour l'élaboration de notre approche d'étude de la convertibilité d'un système d'assemblage automobile.

Après avoir défini ce référentiel scientifique, nous avons, dans le troisième chapitre, explicité un concept autour de la convertibilité du système d'assemblage automobile, que nous avons baptisé AutoConvert, en référence à l'Automobile et à la Convertibilité. Ce concept met en exergue les principaux paramètres de l'évaluation de la convertibilité en se basant sur les spécificités de l'assemblage automobile.

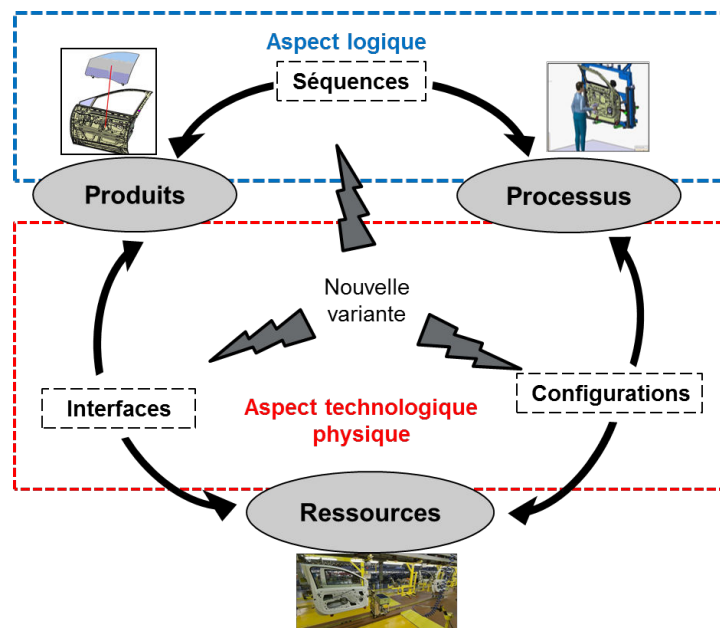
Dans le chapitre 4, trois indicateurs technologiques de convertibilité ont été introduits pour doter les industriels d'un outil d'aide à la décision qui intègre les principaux leviers sur lesquels il faut agir pour faire face à la diversité du produit. En outre, une étude de coûts a été parallèlement réalisée en vue de consolider les résultats des indicateurs technologiques.

Nous avons appliqué dans le chapitre 5, l'ensemble des indicateurs introduits dans cette thèse à des cas concrets d'usines RENAULT.

Les résultats obtenus ont montré la pertinence des paramètres sélectionnés et identifié quelques perspectives s'inspirant de ce travail de recherche.

Par conséquent, nous résumons les solutions apportées à la problématique initialement posée comme suit :

- Le positionnement du système d'assemblage automobile par rapport aux différents systèmes de production. Cela a permis de caractériser le système d'assemblage automobile, en le comparant au système d'usinage, qui est celui qui a fait l'objet de nombreux travaux scientifiques.
- La construction du concept, AutoConvert, pour l'évaluation de la convertibilité de la ligne d'assemblage automobile. En effet, trois éléments principaux le composent à savoir les produits, les processus et les ressources. Ces trois éléments sont en forte interaction lors de l'introduction d'une nouvelle variante. Cela a permis de mettre en avant trois paramètres clé en vue d'évaluer la convertibilité d'une ligne d'assemblage, à savoir les séquences, les configurations et les interfaces que ce soit de posage, de préhension et/ou les interfaces outils.



AutoConvert : Convertibilité d'un système d'assemblage Automobile

- La construction de trois indicateurs technologiques de convertibilité caractérisant les trois interactions introduites par AutoConvert, à savoir :
 - **L'indicateur de la convertibilité Processus – Ressources.** La convertibilité à ce niveau est évaluée selon la capacité des séquences existantes d'assemblage à incorporer les nouvelles étapes de transformation potentielles et/ ou les nouvelles contraintes de précédence.
 - **L'indicateur de la convertibilité Processus – Ressources.** A ce niveau, l'importance est donnée au nombre de pas de travail exigés par le nouveau processus ainsi que leur disponibilité dans la(es) usine(s) concernée(s). Le nombre de pas supplémentaires est le résultat d'un écart de séquence d'assemblage ou de temps d'assemblage. La convertibilité est ainsi évaluée suivant la capacité de la configuration existante à gérer les pas de travail supplémentaires nécessaires.

- **L’indicateur de la convertibilité Produits – Processus.** L’accent est mis au niveau de cette interaction sur les interfaces entre les ressources et les produits. Il s’agit des interfaces physiques qui décrivent les surfaces de contact entre les produits et les ressources, que ce soit avec le système de manutention (les interfaces de posage et de préhension), ou avec les machines et les outils (les interfaces - outils). La convertibilité à ce niveau est évaluée selon la capacité des interfaces existantes à absorber la diversité des composants.
- La réalisation d’une étude économique de la convertibilité pour compléter l’aspect technologique introduit par les indicateurs. En effet, l’étude de coût permet d’intégrer des aspects supplémentaires, qui n’ont pas été pris en compte dans le développement des indicateurs technologiques, tels que la localisation géographique de l’usine considérée.

Ces travaux ont fait l’objet de quatre communications internationales (lafou et al., 2014), (lafou et al.2015), (lafou et al. 2016a) et (lafou et al.2016b).

Perspectives de recherche

Devant l’étendue des domaines abordés pour le traitement de notre problématique, les perspectives peuvent être multiples, tant dans le domaine de la gestion de la diversité que dans le domaine de la convertibilité des lignes d’assemblage. Le but de ce paragraphe est d’apporter un regard extérieur à nos travaux, afin de proposer des perspectives s’inspirant de notre travail de recherche en vue de l’améliorer et d’étendre son applicabilité. Pour ce faire, nous proposons quatre perspectives de recherche, dont une perspective destinée à concrétiser les approches proposées afin de permettre un déploiement rapide du concept AutoConvert, les trois autres perspectives ont pour objectif d’améliorer la prise en compte de la réalité du terrain en remettant en cause certaines hypothèses considérées lors de la construction des indicateurs. Nous décrivons ces perspectives ci-dessous :

- **Développement d’un outil informatique pour le déploiement des indicateurs de la convertibilité.** La nécessité de développer et d’implémenter les indicateurs de convertibilité dans un outil informatique connecté aux différentes bases de données en interne afin de permettre une gestion efficace des informations du triptyque Produits – Processus – Ressources. En effet, les données doivent être répertoriées sous un standard commun pour faciliter leur extraction et par conséquent, l’application des indicateurs. Cet outil représentera un support d’aide à la décision pour les concepteurs quant à l’évaluation de la convertibilité des lignes d’assemblage lors de l’introduction d’une diversité véhicule.
- **Prise en compte de l’opérateur dans la modélisation de la convertibilité du système d’assemblage automobile.** Les opérateurs peuvent être considérés 100% convertibles, mais seulement à un seuil de complexité donné. Une prise en compte de ce paramètre dans l’évaluation de la convertibilité permettra une meilleure représentation de la réalité du terrain. En effet, La capacité humaine d’adaptation n’est pas sans limite. Elle

subit des contraintes cognitives fortes liées en particulier à une abstraction plus élevée des processus et aux exigences d'une production plus variée et moins prévisible, qui sollicitent davantage d'attention, d'intelligence et de capacité d'initiative de la part des opérateurs. Dans le cadre de cette étude, l'opérateur considérée comme une ressource, sa prise en compte pourrait être intégrée à l'indicateur de convertibilité Produits – Ressources.

- **Intégration de paramètres de l'évolutivité.** Cela permettra de comparer des usines à cadences différentes et donc d'élargir l'éventail des usines à comparer quant à l'introduction d'une nouvelle variante. En effet, la flexibilité est un terme qui intègre la convertibilité et l'évolutivité. Le cahier des charges, fixé initialement, supposait que les lignes d'assemblage étaient à cadence égale. Or, cela est rarement le cas. Par conséquent, l'évaluation de la convertibilité du système peut être conditionnée par l'évolutivité désirée. Ainsi, il serait intéressant d'étudier la convertibilité et l'évolutivité du système simultanément pour mettre en évidence les interactions et les limites qui peuvent exister.
- **Proposition de solutions technologiques en vue de réduire les diversités technique et processus.** Pour pouvoir améliorer la convertibilité, il faut chercher à minimiser la face cachée de la diversité (à savoir, la diversité processus et la diversité technique), tout en gardant, la diversité fonctionnelle qui, elle, représente la vraie valeur ajoutée perçue par le client et permet, par conséquent, à l'entreprise de faire face à la concurrence. Minimiser les diversités technique et processus, exige de standardiser l'ensemble des interfaces Produits - Ressources (Outils, préhension et posage) afin d'améliorer la convertibilité et la pérennité des sites industriels. A ce titre, des travaux complémentaires autour de la conception modulaire produits/processus/ressources permettraient de renforcer la pertinence de l'approche développée par AutoConvert.

Bibliographie

- [Abdi 05] MR Abdi. *Selection of a layout configuration for reconfigurable manufacturing systems using the AHP*. ISAHP, Honolulu, Hawaii, 2005.
- [Abdul-Hamid 99] YT Abdul-Hamid, AK Kochhar & MK Khan. *An analytic hierarchy process approach to the choice of manufacturing plant layout*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture, vol. 213, no. 4, pages 397–406, 1999.
- [Agard 03] B Agard & M Tollenaere. *Design of product families : methodology and application*. In DS 31 : Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design, Stockholm, 2003.
- [Ait-El-Hadj 89] S Ait-El-Hadj. *Management de l'innovation technologique*. P. Joffre et Y. Simon (eds), Encyclopédie Française de Gestion, Paris, Economica, pages 1629–1643, 1989.
- [Alexopoulos 05] K Alexopoulos, S Burkner, I Milionis & G Chryssolouris. *DESYMA-An integrated method to aid the design and the evaluation of reconfigurable manufacturing systems*. In Proceedings of the 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005), pages 467–475, 2005.
- [Alexopoulos 07] K Alexopoulos, D Mourtzis, N Papakostas & G Chryssolouris. *DESYMA : assessing flexibility for the lifecycle of manufacturing systems*. International Journal of Production Research, vol. 45, no. 7, pages 1683–1694, 2007.
- [AlGeddawy 13] T AlGeddawy & HA ElMaraghy. *Reactive design methodology for product family platforms, modularity and parts integration*. CIRP Journal of Manufacturing Science and technology, vol. 6, no. 1, pages 34–43, 2013.
- [Avikal 13] S Avikal, R Jain, PK Mishra & HC Yadav. *A heuristic approach for U-shaped assembly line balancing to improve labor productivity*. Computers & Industrial Engineering, vol. 64, no. 4, pages 895–901, 2013.

- [Azab 07] A Azab & HA ElMaraghy. *Mathematical modeling for reconfigurable process planning*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 56, no. 1, pages 467–472, 2007.
- [Battaïa 13] O Battaïa & A Dolgui. *A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches*. International Journal of Production Economics, vol. 142, no. 2, pages 259–277, 2013.
- [Baybars 86] I Baybars. *A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem*. Management science, vol. 32, no. 8, pages 909–932, 1986.
- [Bechrakis 97] K Bechrakis, S Karagiannis & G Chryssolouris. *The ζ -analogy method for the modelling of manufacturing systems*. In World congress on intelligent manufacturing processes & systems, pages 166–169, 1997.
- [Becker 06] C Becker & A Scholl. *A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing*. European journal of operational research, vol. 168, no. 3, pages 694–715, 2006.
- [Beskese 04] A Beskese, C Kahraman & Z Irani. *Quantification of flexibility in advanced manufacturing systems using fuzzy concept*. International Journal of Production Economics, vol. 89, no. 1, pages 45–56, 2004.
- [Bordoloi 99] S K Bordoloi, WW Cooper & H Matsuo. *Flexibility, adaptability, and efficiency in manufacturing systems*. Production and Operations Management, vol. 8, no. 2, pages 133–150, 1999.
- [Bourguignon 96] A Bourguignon. *Définir la performance : une simple question de vocabulaire ?* Performance et ressources humaines, Economica, Paris, pages 218–235, 1996.
- [Boysen 07] N Boysen, M Flidner & A Scholl. *A classification of assembly line balancing problems*. European Journal of Operational Research, vol. 183, no. 2, pages 674–693, 2007.
- [Browne 84] J Browne, D Dubois, K Rathmill, SP Sethi, KE Steckee *et al.* *Classification of flexible manufacturing systems*. The FMS magazine, vol. 2, no. 2, pages 114–117, 1984.
- [Bruggemann 06] C Bruggemann. *Results report of the joint research project : Fascination Car Body Engineering–Part 2 : Concept development and assessment*. In Proceedings of the Automotive Circle International conference–Fascination Automobile-Modularization, pages 28–29, 2006.

- [Cardin 08] O Cardin, P Castagna & E Chové. *La simulation pour l'aide au pilotage des systèmes contrôlés par le produit*. In 7e Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation-MOSIM'08, page CDRom, 2008.
- [Chang 07] A Chang. *On the measurement of routing flexibility : A multiple attribute approach*. International Journal of Production Economics, vol. 109, no. 1, pages 122–136, 2007.
- [Christofol 04] H Christofol, S Richir & H Smier. *L'innovation à l'ère des réseaux*. Hermes Science, 2004.
- [Chryssolouris 92] G Chryssolouris & M Lee. *An assessment of flexibility in manufacturing systems*. Manufacturing Review, vol. 5, no. 2, pages 105–116, 1992.
- [Chryssolouris 96] G Chryssolouris, M Lee & A Ramsey. *Confidence interval prediction for neural network models*. Neural Networks, IEEE Transactions on, vol. 7, no. 1, pages 229–232, 1996.
- [Chryssolouris 13] G Chryssolouris. *Manufacturing systems : theory and practice*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [Ciavaldini 95] B Ciavaldini & JL Loubet. *La diversité dans l'industrie automobile française : Hésitations et enjeux : regards croisés de l'historien et du gestionnaire*. Gérer et comprendre, no. 41, pages 4–19, 1995.
- [Cohanier 10] B Cohanier, P Lafage, A Loiseau & IAE d'Amiens. *Management de la Performance : des Représentations à la Mesure*. In 9th International Marketing Trends Conference, 2010.
- [De La Villarmois 01] O De La Villarmois. *Le concept de performance et sa mesure : un état de l'art*. Les Cahiers de la Recherche, pages 1–21, 2001.
- [De Leeuw 96] ACJ De Leeuw & HW Volberda. *On the concept of flexibility : a dual control perspective*. Omega, vol. 24, no. 2, pages 121–139, 1996.
- [De Matta 01] R De Matta, VN Hsu & CJ Feng. *Short-term capacity adjustment with offline production for a flexible manufacturing system under abnormal disturbances*. Annals of Operations Research, vol. 107, no. 1-4, pages 83–100, 2001.
- [De Toni 98] A De Toni & S Tonchia. *Manufacturing flexibility : a literature review*. International journal of production research, vol. 36, no. 6, pages 1587–1617, 1998.

- [Devalan 06] P Devalan. L'innovation de rupture : clé de la compétitivité. Hermès science publ., 2006.
- [Devise 00] O Devise & H Pierreval. *Indicators for measuring performances of morphology and material handling systems in flexible manufacturing systems*. International Journal of Production Economics, vol. 64, no. 1, pages 209–218, 2000.
- [Dombrowski 14] U Dombrowski, P Krenkel & D Ebentreich. *Adaptability within a Multi-variant Serial Production*. Procedia CIRP, vol. 17, pages 124–129, 2014.
- [Dyer 06] L Dyer & J Ericksen. *Dynamic organizations : Achieving marketplace agility through workforce scalability*. 2006.
- [ElMaraghy 13] HA ElMaraghy, G Schuh, W ElMaraghy, F Piller, P Schönsleben, M Tseng & A Bernard. *Product variety management*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 62, no. 2, pages 629–652, 2013.
- [Erol 99] M Erol. *Prise en compte de la flexibilité dans la planification dynamique*. PhD thesis, 1999.
- [Essafi 10] M Essafi, X Delorme, A Dolgui & O Guschinskaya. *A MIP approach for balancing transfer line with complex industrial constraints*. Computers & Industrial Engineering, vol. 58, no. 3, pages 393–400, 2010.
- [Everaere 97] C Everaere. Management de la flexibilité. Economica, 1997.
- [Ford 08] H Ford. My life and work : an autobiography of henry ford. BN Publishing, 2008.
- [Georgoulas 07] K Georgoulas, N Papakostas, S Makris & G Chryssolouris. *A toolbox approach for flexibility measurements in diverse environments*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 56, no. 1, pages 423–426, 2007.
- [Gibert 80] P Gibert. Le contrôle de gestion dans les organisations publiques. Editions d'Organisation, 1980.
- [Gupta 92] D Gupta, Y Gerchak & JA Buzacott. *The optimal mix of flexible and dedicated manufacturing capacities : Hedging against demand uncertainty*. International Journal of Production Economics, vol. 28, no. 3, pages 309–319, 1992.
- [Gupta 04] D Gupta & S Benjaafar. *Make-to-order, make-to-stock, or delay product differentiation ? A common framework for modeling and analysis*. IIE transactions, vol. 36, no. 6, pages 529–546, 2004.

- [He 98] D He, A Kusiak & TLB Tseng. *Delayed product differentiation : a design and manufacturing perspective*. Computer-Aided Design, vol. 30, no. 2, pages 105–113, 1998.
- [Homem De Mello 90] LS Homem De Mello & AC Sanderson. *AND/OR graph representation of assembly plans*. Robotics and Automation, IEEE Transactions on, vol. 6, no. 2, pages 188–199, 1990.
- [Hon 05] KKB Hon. *Performance and evaluation of manufacturing systems*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 54, no. 2, pages 139–154, 2005.
- [Hopp 11] WJ Hopp & ML Spearman. *Factory physics*. Waveland Press, 2011.
- [Hu 08] SJ Hu, Xiaowei Zhu, Hui Wang & Y Koren. *Product variety and manufacturing complexity in assembly systems and supply chains*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 57, no. 1, pages 45–48, 2008.
- [Hu 11] SJ Hu, J Ko, L Weyand, HA ElMaraghy, TK Lien, Y Koren, Hl Bley, G Chryssolouris, N Nasr & M Shpitalni. *Assembly system design and operations for product variety*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 60, no. 2, pages 715–733, 2011.
- [Jin 03] M Jin & SD Wu. *A new heuristic method for mixed model assembly line balancing problem*. Computers & Industrial Engineering, vol. 44, no. 1, pages 159–169, 2003.
- [Jose 05] A Jose & M Tollenaere. *Modular and platform methods for product family design : literature analysis*. Journal of Intelligent manufacturing, vol. 16, no. 3, pages 371–390, 2005.
- [Kanai 96] S Kanai, H Takahashi & H Makino. *ASPEN : computer-aided assembly sequence planning and evaluation system based on predetermined time standard*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 45, no. 1, pages 35–39, 1996.
- [Ko 08] J Ko & JS Hu. *Balancing of manufacturing systems with complex configurations for delayed product differentiation*. International Journal of Production Research, vol. 46, no. 15, pages 4285–4308, 2008.
- [Koren 98] Y Koren, SJ Hu & TW Weber. *Impact of manufacturing system configuration on performance*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 47, no. 1, pages 369–372, 1998.
- [Koren 99] Y Koren, U Heisel, F Jovane, T Moriwaki, G Pritschow, G Ulsoy & H Van Brussel. *Reconfigurable manufacturing systems*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 48, no. 2, pages 527–540, 1999.

- [Koren 10a] Y Koren. The global manufacturing revolution : product-process-business integration and reconfigurable systems, volume 80. John Wiley & Sons, 2010.
- [Koren 10b] Y Koren & M Shpitalni. *Design of reconfigurable manufacturing systems*. Journal of manufacturing systems, vol. 29, no. 4, pages 130–141, 2010.
- [Lafou 14] M Lafou, L Mathieu, S Pois & M Alochet. *Convertibility Indicator for Manual Mixed-model Assembly Lines*. Procedia CIRP, vol. 17, pages 314–319, 2014.
- [Lafou 15] M Lafou, L Mathieu, S Pois & M Alochet. *Manufacturing System Configuration :Flexibility Analysis For automotive Mixed-Model Assembly Lines*. IFAC, vol. 48, pages 94–99, 2015.
- [Lafou 16a] M Lafou, L Mathieu, S Pois & M Alochet. *Manufacturing System Flexibility : Product Flexibility Assessment*. Procedia CIRP, vol. 41, pages 99–104, 2016.
- [Lafou 16b] M Lafou, L Mathieu, S Pois & M Alochet. *Manufacturing System Flexibility :Sequence Flexibility Assessment*. Procedia CIRP, 2016.
- [Lanza 10] G Lanza, K Peter, J Rühl & S Peters. *Assessment of flexible quantities and product variants in production*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, vol. 3, no. 4, pages 279–284, 2010.
- [Lee 97] HL Lee & CS Tang. *Modelling the costs and benefits of delayed product differentiation*. Management science, vol. 43, no. 1, pages 40–53, 1997.
- [Lesert 11] A Lesert, G Alpan, Y Frein & S Noire. *Definition of spacing constraints for the car sequencing problem*. International Journal of Production Research, vol. 49, no. 4, pages 963–994, 2011.
- [Maier-Sperdelozzi 02] V Maier-Sperdelozzi & SJ Hu. *Selecting manufacturing system configurations based on performance using AHP*. Technical papers-society of manufacturing engineers -All series-, 2002.
- [Maier-Sperdelozzi 03] V Maier-Sperdelozzi, T Freiheit & SJ Hu. *Convertibility and Productivity of Manufacturing System Configurations*. In ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, pages 381–390. American Society of Mechanical Engineers, 2003.
- [McAuley 72] J McAuley. *Machine grouping for efficient production*. Production Engineer, vol. 51, no. 2, pages 53–57, 1972.

- [Mehrabi 00] MG Mehrabi, AG Ulsoy & Y Koren. *Reconfigurable manufacturing systems : key to future manufacturing*. Journal of Intelligent manufacturing, vol. 11, no. 4, pages 403–419, 2000.
- [Mons 10a] P Mons, L Tapie & L Mathieu. *Modularization of multi-physics complex systems*. In 3rd CIRP conference on Assembly Technologies and Systems, page 4p, 2010.
- [Mons 10b] P Mons, L Tapie, L Mathieu, B Dantin & N Chevassus. *Modular Design for Complex Systems*. In IDMME - 8th Virtual Concept, 2010.
- [Nanda 07] J Nanda, HJ Thevenot, TW Simpson, RB Stone, M Bohm & SB Shooter. *Product family design knowledge representation, aggregation, reuse, and analysis*. AI EDAM : Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing, vol. 21, no. 02, pages 173–192, 2007.
- [Navaei 16] J Navaei & HA ElMaraghy. *Grouping part/product variants based on networked operations sequence*. Journal of Manufacturing Systems, vol. 38, pages 63–76, 2016.
- [Papakostas 07] N Papakostas & D Mourtzis. *An Approach for Adaptability Modeling in Manufacturing–Analysis Using Chaotic Dynamics*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 56, no. 1, pages 491–494, 2007.
- [Park 05] S Park & V Sugumaran. *Designing multi-agent systems : a framework and application*. Expert Systems with Applications, vol. 28, no. 2, pages 259–271, 2005.
- [Rajan 05] PK Rajan, M Van Wie, MI Campbell, KL Wood & KN Otto. *An empirical foundation for product flexibility*. Design Studies, vol. 26, no. 4, pages 405–438, 2005.
- [Ross 08] AM Ross, DH Rhodes & DE Hastings. *Defining changeability : Reconciling flexibility, adaptability, scalability, modifiability, and robustness for maintaining system lifecycle value*. Systems Engineering, vol. 11, no. 3, pages 246–262, 2008.
- [Sako 99] M Sako & F Murray. *Modules in design, production and use : implications for the global auto industry*. In IMVP Annual Sponsors Meeting. Citeseer, 1999.
- [Samy 10] SN Samy & HA ElMaraghy. *A model for measuring assembly systems complexity*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010.

- [Schäfer 80] FW Schäfer. *System zur Nutzung und Planung der Unternehmensflexibilität*. PhD thesis, Dissertation RWTH Aachen, 1980.
- [Schmigalla 95] H Schmigalla. *Fabrikplanung : Begriffe und zusammenhänge*. Hanser Verlag, 1995.
- [Schuh 12] G Schuh, J Arnoscht & M Völker. *Product Design Leverage on the Changeability of Production Systems*. *Procedia CIRP*, vol. 3, pages 305–310, 2012.
- [Schulz 99] AP Schulz & E Fricke. *Incorporating flexibility, agility, robustness, and adaptability within the design of integrated systems-key to success?* In *Digital Avionics Systems Conference, 1999. Proceedings. 18th, volume 1*, pages 1–A. IEEE, 1999.
- [Sethi 90] AK Sethi & SP Sethi. *Flexibility in manufacturing : a survey*. *International journal of flexible manufacturing systems*, vol. 2, no. 4, pages 289–328, 1990.
- [Shivanand 06] HK Shivanand. *Flexible manufacturing system*. New Age International, 2006.
- [Simpson 01] TW Simpson, JR Maier & F Mistree. *Product platform design : method and application*. *Research in engineering Design*, vol. 13, no. 1, pages 2–22, 2001.
- [Son 87] YK Son & CS Park. *Economic measure of productivity, quality and flexibility in advanced manufacturing systems*. *Journal of Manufacturing systems*, vol. 6, no. 3, pages 193–207, 1987.
- [Spicer 02] P Spicer, Y Koren, M Shpitalni & D Yip-Hoi. *Design principles for machining system configurations*. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 51, no. 1, pages 275–280, 2002.
- [Staeblein 15] T Staeblein & K Aoki. *Planning and scheduling in the automotive industry : A comparison of industrial practice at German and Japanese makers*. *International Journal of Production Economics*, vol. 162, pages 258–272, 2015.
- [Terkaj 09] W Terkaj, T Tolio & A Valente. *Design of focused flexibility manufacturing systems (FFMSs)*. In *Design of Flexible Production Systems*, pages 137–190. Springer, 2009.
- [Tharumarajah 96] A Tharumarajah. *Comparison of the bionic, fractal and holonic manufacturing system concepts*. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 9, no. 3, pages 217–226, 1996.

- [Tolio 08] T Tolio. *Design of flexible production systems*. Springer, 2008.
- [Tolio 10] T Tolio, D Ceglarek, HA ElMaraghy, A Fischer, SJ Hu, L Laperrière, ST Newman & J Váncza. *SPECIES—Co-evolution of products, processes and production systems*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 59, no. 2, pages 672–693, 2010.
- [Upton 94] DM Upton. *The management of manufacturing flexibility*. California management review, vol. 36, no. 2, pages 72–89, 1994.
- [Urbani 06] A Urbani. *Life Cycle Cost Calculation for Manufacturing Systems by Means of Reconfigurability Analysis*. In *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, pages 643–658. Springer, 2006.
- [Valckenaers 05] P Valckenaers & H Van Brussel. *Holonic manufacturing execution systems*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 54, no. 1, pages 427–432, 2005.
- [Van Brussel 98] H Van Brussel, J Wyns, P Valckenaers, L Bongaerts & P Peeters. *Reference architecture for holonic manufacturing systems : PROSA*. Computers in industry, vol. 37, no. 3, pages 255–274, 1998.
- [Walker 04] B Walker, CS Holling, SR Carpenter & A Kinzig. *Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems*. Ecology and society, vol. 9, no. 2, page 5, 2004.
- [Warburton 99] M Warburton & M Sako. *MIT International Motor Vehicle Programme Modularization and Outsourcing Project Preliminary Report of European Research Team*. 1999.
- [Warnecke 82] HJ Warnecke & R Steinhilper. *Flexible manufacturing systems, EDP-support planning : application examples*. In *Proceedings of the First International Conference on Flexible Manufacturing Systems*, pages 345–356. IFS Publications Ltd Kempston, Bedford, UK, 1982.
- [Wiendahl 07] HP Wiendahl, HA ElMaraghy, P Nyhuis, MF Zäh, HH Wiendahl, N Duffie & M Brieke. *Changeable manufacturing-classification, design and operation*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 56, no. 2, pages 783–809, 2007.
- [Xu 05] Z Xu & M Liang. *Concurrent optimization of product module selection and assembly line configuration : a multi-objective approach*. Journal of manufacturing science and engineering, vol. 127, no. 4, pages 875–884, 2005.

- [Yin 06] Y Yin. Application similarity coefficient method to cellular manufacturing. INTECH Open Access Publisher, 2006.
- [Zhu 08] X Zhu, SJ Hu, Y Koren & SP Marin. *Modeling of manufacturing complexity in mixed-model assembly lines*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 130, no. 5, page 051013, 2008.

Titre : Contribution à la conception de systèmes d'assemblage automobile, performants, pérennes et innovants par des indicateurs technologiques et économiques répondant à la diversité croissante des produits.

Mots clés : *Lignes d'assemblage automobile, gestion de la diversité, Performance, Flexibilité, Convertibilité.*

Résumé : Dans un environnement compétitif et incertain, l'industrie automobile est confrontée à de nouveaux défis pour répondre aux exigences des clients, qui sont en constante évolution. La personnalisation de masse a augmenté considérablement la diversité des produits et par conséquent, a mis à l'épreuve la capacité des systèmes de production existants à faire face à cette nouvelle conjoncture. La convertibilité traduit la capacité du système de production à produire une diversité de produits à moindre coût. Cette thèse analyse la définition et les dimensions de la convertibilité et examine les inducteurs de la convertibilité des systèmes de production et plus particulièrement celle des lignes d'assemblage automobile. En se basant sur les pratiques industrielles, un nouveau concept, baptisé AutoConvert, autour de la

convertibilité du système d'assemblage automobile est explicité. Celui-ci met en exergue l'impact de l'introduction d'une nouvelle variante du produit sur les trois éléments principaux qui composent un système d'assemblage, à savoir les produits, les processus et les ressources. Ensuite, trois indicateurs technologiques sont construits pour quantifier la convertibilité du système d'assemblage et fournir, à la fois aux concepteurs des produits et des lignes d'assemblage, un outil d'aide à la décision pour appuyer leurs orientations et leurs choix. Aussi, une étude de coûts est également menée afin de compléter et consolider les indicateurs technologiques. La pertinence de l'approche est expérimentée sur des cas réels de l'industrie automobile.

Title: Contribution to the design of efficient, sustainable and innovative automotive assembly systems by technological and economic indicators to meet the increasing variety of products.

Keywords: *Automotive assembly lines, Variety management, Efficiency, Flexibility, Convertibility.*

Abstract : In a highly competitive and uncertain environment, the automotive industry is facing new challenges to meet customer requirements that are constantly changing. Mass customization caused that product variety increased drastically and consequently, tested the capacity of the existing production systems to cope with this new situation. Convertibility is the ability of the assembly system to cope with product variety with minimum cost. This thesis analyzes the definition and dimensions of convertibility and investigates the change drivers that make convertibility important for the case of automotive assembly lines. Based on industrial practices, a new concept is

developed, named AutoConvert, regarding the automotive assembly line convertibility. It analyzes the impact of the introduction of a new variant on the three main elements which compose an assembly system, namely Products, Processes and Resources. Then, three technological indicators' are built to quantify assembly line convertibility and provide both assembly line and product designers' with efficient decision-making support tools to support their orientations and choices. A cost study is also conducted in order to complete and consolidate the technological indicators. The relevance of the approach is experimented in real cases from the automotive industry.